

LRE2EV

Rapport Benchmark

Frédéric RYCHEN, AMSE, Aix-Marseille Université
Ana SANDOVAL, Aix-Marseille Université



Partenariat Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Etablissements d'Enseignement Supérieur et de Recherche



Le Partenariat entre la Région et les Etablissements d'Enseignement Supérieur et de Recherche

La région dispose d'un socle de recherche et de formation en sciences humaines et sociales solides et de qualité susceptible d'alimenter la réflexion des différents acteurs de la région, de contribuer à la mise en débat de ses problématiques socio-économiques et de constituer une aide à la décision publique.

Convaincu que la présence de ces formations et laboratoires en sciences humaines et sociales constitue un important potentiel de connaissance du territoire régional, la Région a souhaité mobiliser ce milieu d'expertise au service des politiques régionales pour promouvoir un développement régional fondé sur l'innovation la formation de haut niveau et l'interdisciplinarité des savoirs.

C'est l'objet du partenariat des « Fabriques de la connaissance » que la Région met en œuvre depuis 2015 avec les cinq Universités de la Région et Science Po Aix .

RESUME

Ce rapport contient une analyse comparative des expériences européennes en matière de couplage des énergies renouvelables et recharge du véhicule électrique. Ce document rassemble les projets de recherche et de démonstration contenus dans la base de données JRC outlook smart grid version 2017 et les projets externes qui ont été également identifiés pendant la recherche et qui répondent aux critères de la problématique proposé.

L'objectif de cette analyse est centré sur l'identification de critères clés pour le couplage des énergies renouvelables et des véhicules électriques et de bonnes pratiques reproductibles qui favoriseraient le déploiement de la mobilité électrique dans la région SUD tout en augmentant la part des EnR dans le mix électrique.

Deux questions méritent ainsi d'être abordées. Dans quelles conditions est-il pertinent de coupler les EnR et la recharge des véhicules électriques et quels seraient les opportunités de ce couplage pour la région Sud ? Quelles sont les enjeux techniques et socioéconomiques et du couplage et quelles orientations stratégiques doivent-elles être suivies pour favoriser un couplage efficace ?

Ce rapport se consacre à répondre à la première question en fournissant une analyse détaillée des enjeux du couplage ainsi qu'un retour d'expérience comparatif sur un panel de projet emblématique au niveau français et européen.

TABLE DES MATIERES

RAPPORT BENCHMARK FREDERIC RYCHEN, AMSE, AIX-MARSEILLE UNIVERSITE ANA SANDOVAL, AIX-MARSEILLE UNIVERSITE	1
ANALYSE DE LA TRANSFORMATION NUMERIQUE DES ENTREPRISES	1
RESUME.....	3
INTRODUCTION	5
1. LES ENJEUX DU COUPLAGE DES ENERGIES RENOUVELABLES AVEC LA RECHARGE DES VEHICULES ELECTRIQUES.....	8
1.1. UNE DEFINITION DU COUPLAGE.....	9
1.2. LES CONDITIONS NECESSAIRES AU COUPLAGE.....	9
1.2.1. <i>Le développement des EnR.</i>	9
1.2.2. <i>Le pilotage et la flexibilité des charges</i>	10
1.2.3. <i>Le Vehicle-to-Grid (V2G)</i>	12
1.3. L'INTERET DU COUPLAGE.....	13
1.4. LES DIMENSIONS TERRITORIALES DU COUPLAGE	14
1.4.1. <i>L'intérêt d'un couplage local</i>	14
1.4.2. <i>L'intérêt d'un couplage non local</i>	16
1.5. LES DIFFERENTS TYPES DE COUPLAGE	17
2. ANALYSE COMPAREE DES PROJETS DE COUPLAGE	21
2.1. EXPERIENCES DE COUPLAGE EUROPEENNES ET REGIONALES	24
• <i>Lieu de charge et type de véhicule</i>	28
• <i>Le lieu de charge et type d'énergie, couplage local et non local</i>	29
• <i>Types d'usage</i>	30
• <i>Smart Charging</i>	31
2.2. MODALITES DE COUPLAGE	34
• <i>Modalité de couplage sur lieu de résidence</i>	34
• <i>Modalités du couplage sur les lieux de travail</i>	36
• <i>Modalité de couplage dans les espaces publics</i>	38
• <i>Modalité de couplage dans les parkings publics et privé avec accès limité ou usage particulier</i>	39
2.3. SELECTION DES PROJETS EMBLEMATIQUES	40
2.4. ENSEIGNEMENTS DES PROJETS EMBLEMATIQUES	43
• <i>Modalités de charge</i>	43
• <i>Mobilité et type d'usage</i>	47
• <i>Exploitation des énergies renouvelables</i>	51
• <i>Système d'optimisation de charge</i>	55
• <i>Système de stockage d'énergie</i>	62
3. LES OPPORTUNITES REGIONALES DU COUPLAGE.	67
CONCLUSION	70
BIBLIOGRAPHIE	75

INTRODUCTION

Nous assistons aujourd'hui à une augmentation de la production d'énergie renouvelable afin de d'aller vers une économie décarbonée.

L'introduction des énergies renouvelables (EnR) est une manière de décarboner le mix énergétique et en particulier le mix électrique en favorisant des sources de production ayant des impacts environnementaux plus limités. La France à travers de La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (Loi n° 2015-992 du 17 août 2015) a fixé comme objectif, de porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32 % en 2030. Simultanément, la part du nucléaire dans la production d'électricité sera portée à 50 % à l'horizon 2025. Cette loi a été créée afin de faire face aux effets du changement climatique et a pour objectif principal de réduire la dépendance aux ressources fossiles, et de favoriser la production d'énergie décentralisée. (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016)¹.

Toutefois, le développement décentralisé des EnR n'est pas sans conséquence sur l'évolution des réseaux de distribution. D'une part, l'augmentation de puissance implique le renforcement des réseaux électriques pour supporter la fréquence et la puissance de l'électricité transférée à travers les réseaux. D'autre part, la production d'énergies renouvelables est difficilement prévisible, principalement dans le cas de l'énergie éolienne, (Peças Lopes, 2009)² c'est pourquoi, en période de surproduction, elle peut générer des déséquilibres dans l'offre et la demande d'énergie et, par conséquent, générer une surcharge dans les réseaux électriques. L'augmentation de la puissance installée sur les mailles locales conduit souvent à des investissements de renforcement afin d'éviter les surcharges. Le coût de ces renforcements et le caractère intermittent des productions peuvent ainsi freiner le développement des EnR sur certains territoires.

Le déploiement massif des énergies renouvelables se conçoit dans un système énergétique pilotable (Smart Grid) qui lui permette d'équilibrer au mieux l'offre et la demande d'électricité aux différentes échelles du réseau. Les énergies renouvelables telles que les énergies solaire et éolienne sont difficiles à piloter en raison de leur intermittence. De plus, leurs périodes de production ne coïncident pas forcément avec les pics de consommation, ce qui génère potentiellement des situations de surproduction au fur et à mesure de la croissance des EnR dans le mix électrique. Afin que la production générée pendant les périodes de moindre consommation ne soit pas perdue ou sous valorisée deux voies pistes de solutions peuvent être recherchées : Le développement d'un système de stockage, ou le déplacement d'une partie de la consommation. Le stockage ou la flexibilité demande sont les principaux vecteurs d'ajustement.

Les systèmes de stockage actuels impliquent l'utilisation de batteries qui, du fait de leur développement technologique, sont aujourd'hui assez coûteux. Même s'il est possible d'espérer un abaissement conséquent du coût du stockage du fait de

¹ **Ministère de la Transition écologique et solidaire**, 2016, Loi de transition énergétique pour la croissance verte, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

² **J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida**, 2019, Using Vehicle-to-Grid to Maximize the Integration of Intermittent Renewable Energy Resources in Islanded Electric Grids

l'électrification grandissante des usages, l'impact environnemental des solutions de stockage n'est pas neutre et conduit simultanément à aller rechercher de la flexibilité du côté de la demande en l'orientant ou al réorientant le plus possible vers les périodes de production d'EnR.

Le développement du véhicule électrique n'est pas sans poser de question sur l'aspect plus ou moins déstabilisant de cette nouvelle demande sur l'équilibre des réseaux électriques, notamment en prévision d'une utilisation plus massive. La loi d'orientation sur les nouvelles mobilités évoque l'interdiction de la vente de voitures utilisant des combustibles fossile d'ici à 2040, et tend à favoriser l'achat des véhicules propres via un système de bonus-malus. Suivant de nombreux scénarios nous devons donc nous attendre à une augmentation non négligeable de la flotte de véhicules électriques dans les prochaines années.

Pour autant, il est possible comme pour la demande d'électricité de l'habitat ou des sites d'activité d'envisager de développer une flexibilité des charges des véhicules électriques qui puisse permettre de limiter les contraintes de leur insertion sur le réseau mais aussi d'augmenter le pourcentage d'électricité d'origine renouvelable consommé pour les motifs de déplacement. Considérer le véhicule électrique en tant que consommateur flexible d'énergie renouvelable permet d'envisager un meilleur équilibrage entre l'offre et la demande, ainsi qu'une offre de services complémentaires comme ressource de stockage voire comme fournisseur d'énergie. Cela permet simultanément d'accroître l'intérêt environnemental du véhicule électrique augmentant la mobilisation de l'électricité d'origine renouvelable pour sa charge.

Pour que le véhicule électrique puisse constituer une alternative crédible au modèle actuel de mobilité fondé sur des véhicules thermiques utilisant des énergies fossiles fortement émettrice de CO₂ et de polluants, il faut que l'électricité utilisée soit produite par des sources d'énergie décarbonées et peu polluantes. L'analyse du cycle de vie³ montre que le véhicule électrique est beaucoup plus polluant que le véhicule thermique lors de sa phase de fabrication et de démantèlement, principalement en raison des éléments nécessaires à la fabrication des batteries. Son bilan global ne peut donc être plus favorable que si l'électricité consommée durant sa phase opérationnelle est fortement décarbonnée et si le véhicule parcourt de plus grandes distances.

Le couplage de la charge des véhicules électriques à la production des EnR utilise les synergies potentielles entre ces offres et ces demandes afin de réduire les coûts économiques et environnementaux de leur développement conjoint sur le réseau électrique et dans la société. Le véhicule intervient en tant que consommateur flexible de la production d'énergie renouvelable en absorbant celle-ci aux moments de grande production, ce qui limite le coût de la gestion de l'intermittence et de l'insertion des véhicules électriques dans le réseau de distribution. Réciproquement, l'énergie renouvelable est une source d'énergie propre pour le véhicule électrique qui lui permet de réduire son impact environnemental tout au long de sa phase de vie utile et de pouvoir être une alternative crédible au véhicule thermique.

L'intérêt du couplage doit aussi se comprendre en fonction de l'échelle en référence à laquelle cette adéquation doit se réaliser. Il est possible de concevoir un couplage

³ Ecole des Ponts, ParisTech, Groupe Renault, 2017, MOOC Mobilités et véhicules électriques.

local où la production locale d'EnR serait synchronisée avec la recharge locale des véhicules électriques. Le couplage pourrait aussi se faire entre des offres et des demandes de charges distantes (non connectées au même poste source), voire non synchronisées dans le temps via des certificats d'origine. Dans la présente étude, le couplage local sera principalement étudié car il subit des contraintes de localisation et de temporalité fortes et conduit à différentes configurations par lesquelles les EnR peuvent servir principalement à la charge des véhicules électriques à proximité. Pour cette analyse, quatre modalités de couplage identifiées au début de l'étude ont été prises en compte, lesquelles sont mentionnées ci-dessous :

M1. La couverture de parking de surfaces commerciales associé à des bornes pour recharger les véhicules des clients (+ autoconsommation de l'électricité par la surface commerciale)

M2. La couverture de toitures de bâtiments tertiaires en photovoltaïque associé à des bornes pour recharger les véhicules des salariés ou les véhicules de la flotte entreprises (+ autoconsommation de l'électricité par le bâtiment)

M3. La couverture d'entrepôts en photovoltaïque pour recharger des véhicules utilitaires légers utilisés pour de la petite logistique (+ autoconsommation de l'électricité par l'entrepôt)

M4. La couverture d'abri-jardins ou de maison individuelles/collectives pour recharger les véhicules des particuliers (+ autoconsommation de l'électricité par le(s) logement(s))

Ces quatre modalités regroupent différents points de chargement dans des espaces publics et privés. Les solutions techniques peuvent être très différentes du fait des contraintes techniques du couplage, des lieux mais aussi de leur place dans les trajectoires de mobilité des utilisateurs. L'analyse détaillée des différents projets nous a conduit affiner ces configurations pour identifier 14 configurations de couplage local possibles.

Le présent rapport contient dans sa première partie un cadre théorique définissant les facteurs contribuant à l'opportunité sociale du couplage des énergies renouvelables avec la recharge des véhicules électriques. La deuxième section constitue une base de projets européens mettant en œuvre le couplage afin de mener une comparative de leurs caractéristiques, d'identifier différentes modalités de couplage et en retirer des retours d'expériences utiles pour le déploiement du couplage en Région SUD. La troisième partie du rapport présente les projets régionaux identifiés en mettant en situant leurs caractéristiques et leurs objectifs par rapport à la base de projets. Enfin la dernière section synthétise les principaux enseignements recueillis pour évaluer les modalités de couplages qui présenteraient le meilleur potentiel étant données les caractéristiques de la Région SUD.

1. LES ENJEUX DU COUPLAGE DES ENERGIES RENOUVELABLES

AVEC LA RECHARGE DES VEHICULES ELECTRIQUES

L'augmentation prévisible du parc de véhicules électriques implique une augmentation de la capacité de production d'électricité pour répondre à la demande de recharge de véhicules. Une étude réalisée par le RTE indique qu'en 2030, la consommation électrique pour la recharge du VE représentera 10% de la consommation totale en France, ce qui équivaut à 48 TWh ([RTE, 2019](#)). Afin de répondre à la demande en électricité, il faudra envisager d'augmenter la puissance installée et de renforcer les réseaux électriques pour pouvoir la transporter.

Dans un contexte de réchauffement climatique, les énergies renouvelables (EnR)⁴ sont amenés à remplacer les sources fossiles. Ainsi les gouvernements se sont engagés à augmenter leur capacité en énergies renouvelables dans le cadre de la transition énergétique. L'augmentation de la puissance des EnR nécessite un renforcement des réseaux de production et de distribution locaux, afin de soutenir la capacité de production à tout moment. Du fait de leur intermittence, l'introduction massive des EnR dans le réseau électrique nécessite le développement de nouvelles solutions permettant une meilleure synchronisation entre la demande et l'offre.

Le couplage des énergies renouvelables avec la recharge des véhicules électriques consiste en l'intégration locale ou non locale de la production d'électricité issue d'énergies renouvelables plus particulièrement solaire ou éolienne pour l'alimentation d'un point de charge de véhicules électriques. Le couplage en associant la charge des véhicules électriques avec la production des EnR a pour intérêt de lier dans un même dispositif technique deux problématiques différentes qui peuvent avoir des enjeux communs. Le couplage de la charge du véhicule électrique est un moyen d'absorber la production d'EnR et l'utilisation d'EnR pour la charge des véhicules est un moyen de répondre à une demande croissante d'électricité et de limiter l'impact environnemental de ce nouveau type de mobilité. Pour y parvenir, il est nécessaire que la recharge puisse être pilotable, flexible et accompagnée de systèmes numériques pour optimiser son fonctionnement et sa synchronisation avec la production des EnR. Le couplage est un dispositif complexe qui englobe différents aspects techniques et socioéconomiques afin que le développement du véhicule électrique et le développement des EnR entrent en synergie sur le réseau et dans la société.

Dans cette partie nous rappellerons le champ couvert par le sujet du couplage afin d'identifier les conditions nécessaires à son développement. Ainsi la synergie recherchée entre le développement des EnR et celui du véhicule électrique demande des dispositifs de pilotages s'appuyant sur un réseau électrique intelligent qui mobilise les batteries des véhicules électriques pour rendre divers services en fonction de l'état de l'offre et de la demande à différentes mailles du réseau. Avec cette infrastructure de pilotage le couplage peut créer cette complémentarité entre EnR et véhicules électriques et se concevoir comme un système régulateur sur une maille locale ou non locale. Pour autant, l'identification des opportunités créées par le couplage demandent une analyse plus fine des situations car la dynamique de la production des EnR et celle de la mobilité électrique dépendent fortement des contextes territoriaux, ce qui peut limiter ou modifier les enjeux du couplage.

⁴ L'acronyme EnR sera utilisé pour désigner Energies Renouvelables.

1.1. Une définition du couplage

Le couplage des énergies renouvelables avec la recharge du véhicule électrique consiste en l'utilisation locale ou non locale de la production d'énergie renouvelable à un moment donné pour l'alimentation en ce même moment d'un point de charge de véhicules électriques. L'enjeu principal du couplage est donc la synchronisation des charges des véhicules électriques avec la production d'énergie renouvelable. Le couplage stricto sensu se distingue d'une forme plus faible d'association qui reposerait sur l'utilisation de garanties d'origine pour certifier l'origine renouvelable de l'énergie utilisée pour la charge des véhicules électriques dans la mesure où ces garanties permettent de certifier des volumes d'énergie qui n'ont pas nécessairement été produits de façon synchrone. C'est par conséquent la définition du couplage reposant sur la synchronisation qui sera considérée dans la suite du rapport car ce couplage met en jeu des problématiques de puissance notamment au niveau des réseaux de distribution qui ne sont pas forcément présentes lorsque l'on raisonne uniquement en garantie d'origine sur des volumes d'énergie.

Du point de vue de l'utilisateur du véhicule électrique, l'association et le couplage conduisent bien à pouvoir certifier que la charge s'est effectuée avec de l'électricité provenant de sources renouvelables. Ces deux modes favorisent bien l'usage d'électricité d'origine renouvelable pour la charge des véhicules électriques contribuant ainsi à améliorer leur empreinte environnementale durant leur période d'utilisation. Pour autant du point de vue du réseau, et en particulier du point de vue du réseau de distribution ou d'un réseau particulier, les enjeux du couplage en puissance sont assez différents des enjeux d'une association en volume.

1.2. Les conditions nécessaires au couplage

Le couplage peut être vu comme une modalité particulière de flexibilité de la demande qui concerne la plus grande synchronisation entre la production d'électricité issue de sources renouvelables et la charge des véhicules électriques. La question du couplage se pose dans un contexte particulier de développement important des EnR décentralisées et des véhicules électriques. Le couplage suppose aussi que des dispositifs techniques de pilotage et de flexibilité soient déployés afin de permettre l'ordonnancement des charges en fonction des conditions du réseau et des productions d'EnR. La généralisation de la technologie Vehicle-to-Grid (V2G) qui permet un soutirage et une injection d'électricité entre le véhicule électrique et le réseau est aussi un facteur de nature à accroître l'intérêt du couplage.

1.2.1. Le développement des EnR.

L'augmentation de la production d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire et l'énergie éolienne a un impact sur le système de contrôle d'équilibre du réseau (Longo, 2018)⁵. Pour soutenir la production d'énergies renouvelables et l'intégrer dans les réseaux électriques, l'infrastructure doit être adaptée pour supporter la puissance et assurer la sécurité. La consommation et la production d'électricité

⁵ Longo Michela, Federica Foadelli and Wahiba Yaïci, 2018, Electric Vehicles Integrated with Renewable Energy Sources for Sustainable Mobility

doivent aussi être équilibrées pour éviter les variations de fréquence et de tension et pour ne pas endommager l'infrastructure du réseau.

La particularité de l'électricité provenant de sources renouvelables est qu'elle est tributaire des conditions de production. La variation du rayonnement solaire ou de la vitesse du vent dépend en grande partie des conditions météorologiques qui rendent la production d'EnR intermittentes et fluctuantes, limitant ainsi leur performance (Colmenar-Santos, 2019)⁶. Les installations d'énergie renouvelable sont donc conçues pour produire le maximum d'énergie possible afin de rentabiliser les systèmes et d'amortir l'investissement sur une période donnée. Des écrêtements ou des effacements sont coûteux et pèsent sur le retour sur investissement.

L'autre particularité des productions d'énergie renouvelable est d'être principalement réalisée de manière décentralisée. Par conséquent, les lieux de production sont plus facilement proches des lieux de consommation (CRE, août 2019)⁷. Toutefois cette proximité entre lieu de consommation et lieu de production ne conduit pas forcément à améliorer la stabilité du réseau car ces productions d'énergies renouvelables se branchent de plus en plus sur les réseaux de distribution, diminuant le foisonnement potentiel.

Garantir l'équilibre dans le réseau devient plus difficile car il y a plus postes de production qui doivent être exploités à tout moment pour valoriser les investissements et contribuer à la consommation d'énergie verte, face à des demandes plus locales et par conséquent plus variables (Hungerford, 2019)⁸.

Au-delà des enjeux de mobilité, le véhicule électrique peut être considéré comme un système hybride participant à la stabilisation de la production d'énergie renouvelable et contribuant à l'amélioration de l'efficacité du fonctionnement des réseaux électriques à une maille plus locale. Le couplage de la production des EnR avec la recharge des véhicules électriques pourrait avoir pour objectif plus général de limiter les impacts du déploiement massif des EnR sur les réseaux électriques (CRE, 2018⁹ et CRE, août 2019¹⁰). Pour qu'un tel couplage puisse se faire, il est nécessaire que la recharge soit pilotable, flexible et accompagnée de systèmes numériques pour optimiser son fonctionnement afin de synchroniser les besoins de charge avec les services attendus.

1.2.2. Le pilotage et la flexibilité des charges

Le pilotage ou la flexibilité de la demande devient un élément important de la conduite d'un réseau de plus en plus décentralisé (ref...). Les charges des véhicules électriques représentent un potentiel de flexibilité qui se prête au pilotage et dont le potentiel est amené à croître au fur et à mesure du développement du parc de

⁶ Colmenar, Antonio -Santosa, Antonio-Miguel Muñoz-Gomez, Enrique Rosales-Asensiob, Africa Lopez-Rey, 2019, Electric vehicle charging strategy to support renewable energy sources in Europe 2050 low-carbon scenario p 61-74

⁷ CRE, août 2019, L'importance de la flexibilité de la demande pour la gestion du système électrique, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=flexibilite-demande-systeme-electrique>

⁸ Hungerford. Zoe, Anna Bruce, and Iain MacGill, 2019, The Value of Flexible Load in Power Systems with High Renewable Energy Penetration

⁹ CRE, 2018, Document de réflexion et de proposition, Les réseaux électriques au service des véhicules électriques

¹⁰ CRE, août 2019, L'intégration des EnR : un défi pour les gestionnaires de réseaux, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationenr-defi-gestionnaires-reseaux>

voitures électriques. Le couplage de la charge des véhicules électriques avec la production d'électricité d'origine renouvelable est une forme particulière de flexibilité qui dépend d'un système de pilotage efficace et d'une flexibilité des comportements de charge de la part des usagers. Pour établir un tel modèle de flexibilité de charge adaptable à un territoire, il est nécessaire de connaître les profils de charge des utilisateurs, la disponibilité des EnR et de disposer d'un système de pilotage visant à optimiser leur synchronisation.

Cette flexibilité et le couplage n'est possible que par un système d'information qui trace les flux sur les réseaux électriques. Les réseaux intelligents permettent de créer un système de communication et d'échange de données pour gérer correctement les flux d'énergie dans les réseaux. Dans les réseaux électriques intelligents, la génération, la collecte et l'analyse des données est essentielle pour permettre une meilleure connaissance des sollicitations du réseau et une plus grande optimisation de son utilisation selon des objectifs techniques, économiques et environnementaux.

Le Smart Charging est un dispositif technique de pilotage des charges qui exploite les propriétés des réseaux électriques intelligents et des dispositifs actionnables et automatiques de pilotage déployés sur l'ensemble du réseau afin de permettre de recharger le véhicule lorsque le moment est opportun. Les services permis par le Smart Charging peuvent ainsi être mobilisés plus spécifiquement lorsque la production des EnR est optimale, lorsque des besoins au niveau du réseau se font sentir ou lorsque le prix du kWh compétitif ([Jian, 2018](#))¹¹. Le couplage des charges des véhicules électriques avec la production d'EnR dépend donc de la disponibilité d'un système de pilotage et de l'équipement des différentes parties et acteurs du réseau électrique ainsi que des systèmes de charges.

La flexibilité ne dépend pas uniquement de la présence de dispositifs techniques adaptés, il faut aussi tenir compte de la dimension comportementale induite auprès des consommateurs. En effet, le potentiel de flexibilité dépend aussi de la capacité des usagers à accepter de reporter les sollicitations du réseau dans des périodes plus favorables. Les dispositifs techniques pourraient être optimisés pour que ces flexibilités ne se traduisent pas par des dégradations de la qualité de service. Toutefois, il est à prévoir que selon les formes de flexibilité et la nécessité d'accroître le potentiel disponible, des contraintes d'usages puissent apparaître et que les usagers soient en situation de devoir adapter leurs comportements ou de consentir à une diminution du service rendu. L'acceptabilité de la flexibilité n'est pas seulement d'ordre économique, des facteurs sociaux et psychologiques déterminent la position des individus pour ajuster leurs comportements selon les sollicitations.

Plusieurs facteurs de flexibilité peuvent permettre une meilleure adoption et une meilleure efficacité de la recharge intelligente ([Will, 2016](#))¹². Les facteurs les plus fréquemment évoqués sont les incitations monétaires, la sécurité de la charge avec une source d'énergie inépuisable, le traitement de données personnelles et la confidentialité du système, ainsi que les attitudes cognitives et psychologiques générale des personnes pour adopter le véhicule électrique.

¹¹ Jian. Liu, Zhao Yongqianga, Kim Hyoungmib Keinera, Dominik, Manish Ramb, Larissa De Souza Noel Simas Barbosac, Dmitrii Bogdanovb, 2018, The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai, p 206-214

¹² Will. Christian, Alexander Schuller, 2016, Understanding user acceptance factors of electric vehicle smar charging, p 198-214

L'intégration locale du véhicule électrique peut également améliorer le réseau de distribution grâce à la flexibilité de charge ([Amjad, 2018](#))¹³.

Ces aspects montrent que le couplage EnR et VE nécessite de la flexibilité pour générer des services intelligents qui rendent l'intégration plus attrayante pour les utilisateurs et plus efficace pour le réseau électrique.

1.2.3. Le Vehicle-to-Grid (V2G)

Actuellement, le véhicule électrique est plutôt considéré comme un consommateur d'énergie pour effectuer des déplacements. Le V1G ou technologie unidirectionnelle comprend le passage de l'énergie du réseau au véhicule. La flexibilité peut être fournie de manière unidirectionnelle (V1G), en utilisant le véhicule en tant que consommateur d'énergie renouvelable dans les moments de grande production et en réduisant l'impact sur les réseaux dans le moment de pic de consommation. Cependant, le potentiel du véhicule électrique dans ces usages dépend de la capacité de stockage disponible et donc de la faculté de chaque véhicule à consommer cette énergie par la mobilité afin de disposer d'une capacité de stockage renouvelée. Le véhicule électrique devient ainsi une précieuse source de stockage. Toutefois, le potentiel de stockage du véhicule électrique serait démultiplié dans ses utilisations si l'énergie stockée dans les batteries pouvait ne plus seulement être consommée pour le fonctionnement du véhicule mais pouvait être réinjectée dans le réseau électrique selon différentes modalités de sollicitation. C'est l'objectif de la technologie V2G.

Le V2G fait référence au pilotage du flux d'énergie dans les deux sens, c'est-à-dire en soutirage et en injection sur le réseau. Le concept découle du fait que la plupart des véhicules passent la plupart du temps en stationnement (environ 90% du temps) ([Colmenar-Santos, 2019](#))¹⁴ sur le lieu de travail ou sur le lieu de résidence. Par conséquent, la batterie du véhicule peut être utilisée comme dispositif de stockage distribué permettant d'alimenter le réseau aux heures de pointe ou pour d'autres besoins ou services ([Habib, 2014](#))¹⁵. Certaines études indiquent que les véhicules électriques mobilisant des services V2G permettent une hausse de la pénétration de l'énergie éolienne de 41% à 59% dans un réseau isolé ([Lopes, 2009](#))¹⁶.

Même si le V2G permet d'exploiter pleinement la capacité de stockage des véhicules électriques le potentiel de stockage mobilisable dépend des trajectoires de mobilité et plus particulièrement des temps de stationnement des véhicules électriques. Il reste encore des aspects techniques à explorer pour intégrer efficacement le V2G en tant que mécanisme de stockage d'énergie. Le V2G n'est pas encore une technologie mature, il connaît une faible pénétration dans sa prise en charge par les

¹³ Amjad. Muhammad, Ayaz Ahmadb, Mubashir Husain Rehmanic, Tariq Umerd, 2018, A review of EVs charging: From the perspective of energy optimization, optimization approaches, and charging techniques, p 386-417

¹⁴ Colmenar, Antonio -Santosa, Antonio-Miguel Muñoz-Gomez, Enrique Rosales-Asensiob, Africa Lopez-Rey, 2019, Electric vehicle charging strategy to support renewable energy sources in Europe 2050 low-carbon scenario p 61-74

¹⁵ Habib. Salman, Muhammad Kamran, Umar Rashid, 2015, Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks e A review, p 205-214

¹⁶ J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida, 2019, Using Vehicle-to-Grid to Maximize the Integration of Intermittent Renewable Energy Resources in Islanded Electric Grids

infrastructures de charge et les modèles des constructeurs automobiles permettant la mise en œuvre du V2G sont encore peu nombreux ([Mwasilu, 2014](#))¹⁷.

Toutefois, le V2G accroît l'intérêt de la charge des véhicules électriques durant les périodes de production d'électricité issues de sources renouvelables car à la consommation de cette énergie pour des motifs de mobilité s'ajoute la possibilité d'injecter cette électricité décarbonée lors de périodes plus propices pour le réseau local ou général. Les valorisations potentielles des charges des véhicules électriques sont plus nombreuses. Ainsi le V2G peut être considéré comme un facteur augmentant de l'intérêt du couplage.

1.3. L'intérêt du couplage

L'intérêt du couplage est de contribuer simultanément à améliorer les conditions d'intégration d'une production d'électricité d'origine renouvelable croissante dans le réseau et symétriquement d'améliorer le bilan environnemental des services du véhicule électrique.

À court terme le couplage améliore le bilan environnemental sur le cycle de vie du véhicule électrique et contribue à faciliter sa pénétration sur le marché en augmentant sa compétitivité sociale par rapport aux solutions thermiques.

La mobilisation de la recharge intelligente pour synchroniser les charges à la production d'électricité issue d'EnR permet d'améliorer le bilan environnemental de l'utilisation du véhicule électrique du fait de l'utilisation plus importante des énergies renouvelables ([Jin, 2014](#))¹⁸.

Le couplage, comme dispositif particulier de flexibilité de la demande permet aussi de limiter les coûts des renforcements induits par l'augmentation des charges sur le réseau. C'est particulièrement le cas pour le couplage diurne avec le PV pour des flottes de véhicules sur des parkings d'entreprises ou plus marginalement des zones commerciales.

À long terme et conditionné au développement du V2G c'est plutôt le développement du véhicule électrique qui serait en mesure de favoriser une insertion plus importante des EnR en permettant d'absorber leur surproduction et de la restituer aux périodes de forte demande tout en augmentant les services réseaux liés à la mobilisation de ce stockage distribué et mobile. Dans le cadre du couplage, le V2G peut être vu comme un potentialisateur des EnR, les véhicules électriques permettant le stockage et la meilleure exploitation de cette énergie intermittente.

Le V2G permet une meilleure optimisation de la gestion de la charge et de l'équilibrage étant donné que le VE peut être chargé en période de faible demande et déchargé en période de forte demande. Une gestion et une coordination de la charge permettraient à la courbe de charge de se déplacer afin de réduire l'impact sur le réseau en limitant la puissance maximale.

¹⁷ Mwasilu. Francis, Jackson John Justo, Eun-Kyung Kim, Ton Duc Do, Jin-WooJung, 2014, Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, p 501-516

¹⁸ Jin, C, X. Sheng and P. Ghosh, "Optimized Electric Vehicle Charging with Intermittent Renewable Energy Sources," in IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 8, no. 6, pp. 1063-1072, Dec. 2014.

En plus de son utilisation en tant qu'objet bidirectionnel pour l'injection et le stockage d'énergie, le V2G peut aussi fournir des services de régulation de la tension et de la fréquence (Amjad, 2018)¹⁹. (Habib, 2014)²⁰. Les VE peuvent accepter différentes vitesses de charge lente ou rapide, et régulent la charge en fonction la capacité de la batterie, tandis que le chargeur de batterie est utilisé pour contrôler la tension. Les véhicules peuvent alors se charger lorsque la tension est élevée ou s'arrêter lorsque la tension est basse, ce qui leur permet de maintenir une fréquence stable.

Il est important de noter que le véhicule électrique, même dans une fonction unidirectionnelle, remplit également la fonction de régulation de la tension grâce à la recharge du véhicule en période de moindre demande (Mwasilu, 2014)²¹.

1.4. Les dimensions territoriales du couplage

Les différentes valorisations du couplage sont aussi de natures différentes selon la maille du réseau considérée. Une distinction doit être faite entre le couplage local et non local au regard des impacts sur les différents niveaux du réseau, du fait d'un recours plus ou moins important aux réseaux de transport et de distribution en fonction des localisations des productions et des charges. Le type de source d'énergie est également déterminante pour l'établissement d'un couplage d'une production d'énergie locale ou non locale en fonction des besoins des utilisateurs.

Le couplage local ou non local soulève la question de savoir s'il est préférable de transférer l'électricité produite par les EnR aux points de charge ou de déplacer les points de charge vers les lieux présentant le plus grand potentiel de production d'énergie renouvelable. Ces deux scénarios non exclusifs ne sont pas sans influence sur la répartition des points de charge et sur les comportements des usagers des véhicules électriques. Les opportunités d'un couplage local ou non local dépendent en grande partie des configurations territoriales et notamment de l'espace disponible pour adresser simultanément des besoins de production d'EnR et de charge des véhicules.

1.4.1. L'intérêt d'un couplage local

Le principal intérêt du couplage est plutôt local puisqu'il permet d'absorber la production d'énergie renouvelable au niveau d'une maille du réseau de distribution, c'est à dire en dessous d'un poste source. Ce synchronisme augmente l'autoconsommation locale ou réduit les problématiques d'injection d'un surcroît de puissance sur le réseau local. La charge du véhicule électrique peut être ainsi considérée comme un système modulateur de la puissance puisque cette demande spécifique peut directement absorber la production, réduire l'utilisation des réseaux et éviter la surcharge des équipements ainsi que de l'infrastructure. Dans cette perspective, plusieurs pistes de valorisation du couplage local peuvent être évoquées.

¹⁹ Idem

²⁰ Idem

²¹ Mwasilu. Francis, Jackson John Justo, Eun-Kyung Kim, Ton Duc Do, Jin-WooJung, 2014, Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, p 501-516

Le couplage local, permet de mieux valoriser les productions d'EnR en assurant un débouché et en limitant les possibles surproductions. Déployer localement une production d'EnR (PV notamment) et des bornes de charge de VE permet ainsi d'absorber directement la production sans solliciter le réseau ou d'autres moyens. Le véhicule agit ainsi comme un acteur de la modularisation de la tension et de la puissance en réduisant les contraintes du réseau. Le couplage local, permet d'éviter les coûts de renforcement du réseau à cause de l'injection massive de la production des énergies renouvelables.

Le couplage local réduit les pertes lors l'acheminement de l'énergie, les pertes dépendent de la puissance transportée, de la distance de transport et des conditions météorologique du réseau (RTE, 2017)²². L'intégration locale des EnR et la recharge du véhicule permettent une consommation directe en réduisant les pertes.

Le couplage local pourrait aussi fournir une incitation positive à l'usage et à l'adoption du véhicule électrique. Différentes enquêtes mentionnent qu'une grande partie des personnes sont prêtes à rouler en véhicule électrique mais de préférence avec un mix énergétique issu d'énergies renouvelables. L'enquête menée lors de cette étude confirme ce résultat. Le fait de disposer de la source de production dans le même lieu que la charge garantit de facto l'origine de l'énergie et peut encourager les utilisateurs à consommer davantage conformément à un engagement environnemental et à un comportement souhaité.

Le couplage local peut avoir une incidence sur les profils de charge des individus et sur la consommation d'électricité en modifiant les habitudes de charge. La présence d'EnR sur le lieu de charge pourrait permettre ainsi une meilleure adaptation des comportements de charge à la disponibilité d'énergie.

La production d'énergie décentralisée à petite ou grande échelle permet d'accroître la couverture électrique dans les endroits où les réseaux ne peuvent pas facilement accéder. Dans ce cas, le couplage local permet un déploiement joint du véhicule électrique dans une configuration proche d'un micro-grid.

Pour avoir un couplage local, il est nécessaire de mobiliser différents acteurs à s'engager dans une production locale. Des aides publiques sont nécessaires afin de promouvoir la démocratisation de l'énergie et de réduire l'écart entre les personnes qui ont accès à une opportunité d'abord d'avoir un véhicule électrique et d'autre part de pouvoir accéder à un système de production local (Thompson, 2013)²³.

Les opportunités d'un couplage local deviennent de plus en plus grandes du fait de développement de la production d'EnR décentralisées. Ce couplage semble plus indiqué dans les endroits où le véhicule reste stationné la plupart du temps car les temps d'immobilité permettent de disposer d'un créneau horaire suffisamment large pour absorber l'énergie produite pendant la journée. Le couplage local semble plus adapté dans les lieux où il est possible d'avoir une maîtrise globale des aménagements et un stationnement important des véhicules afin de pouvoir dimensionner au mieux la production et les points de charge en fonction des habitudes des usagers. Dans cette perspective locale, les sites d'entreprises et les espaces résidentiels semblent les plus pertinent avec les parkings relais ou de

²² RTE, 2017, Le taux de pertes en 2017 est stable, <https://bilan-electrique-2017.rte-france.com/reseau-de-transport/63-le-taux-de-pertes/#>

²³ Thompson, Griffin, Morgan Bazilian, 2013, Democratization, Energy Poverty, and the Pursuit of Symmetry

covoiturage. Dans le cas des résidences, il sera nécessaire de réfléchir aussi à un système de stockage ou d'intégrer la technologie V2G, puisque le véhicule est généralement stationné la nuit, et donc ne peut pas absorber la production locale d'EnR générée dans la propriété.

1.4.2. L'intérêt d'un couplage non local

Le principal intérêt du couplage non local est de permettre de rechercher une meilleure performance de la production des énergies renouvelables car elles peuvent être installées dans les espaces qui optimisent les conditions climatiques et géographiques nécessaires à leur production sans nécessiter d'être proche de lieux ayant un intérêt dans les parcours de mobilité.

Le couplage non local est associé à un effort plus important sur l'investissement dans le renforcement du réseau et des capacités de production du fait du transport de l'énergie jusqu'au lieu de charge.

Toutefois, le couplage non local permet une insertion plus grande des EnR car par le plus grand foisonnement de la demande les fluctuations et les déséquilibres sont réduits. Cette exploitation sur un périmètre plus large peut augmenter les perspectives de valorisation du couplage et favoriser la rentabilité des investissements.

Dans ce contexte, le développement des technologies pour améliorer l'insertion des EnR dans le réseau est un point clé. Le développement des smart grids et des technologies V2G améliorent les opportunités techniques du couplage non local, car le véhicule électrique peut fonctionner en tant que consommateur d'énergie mais aussi en tant que producteur dans un système bidirectionnel et qui peut participer à rendre plus efficace le système de production et de transport par différents services à différentes échelles du réseau (CRE, août 2019)²⁴.

Le couplage non local touche une partie plus grande de la population et en moyenne d'alimente plus de véhicules du fait du foisonnement des productions et des consommations. Ce développement du couplage sur une maille géographique plus large est favorable à l'apparition d'économie d'échelle dans la production ou d'effet de renforcement entre l'offre d'électricité d'origine renouvelable et la demande de véhicules électriques étant donné le réseau de charge.

La densité territoriale ainsi que le nombre d'utilisateurs viennent contraindre fortement le couplage local du fait de la rareté des espaces disponibles pour la production et de la puissance importante appelée. Les configurations urbaines semblent ainsi se prêter plus à un couplage non local en permettant de mobiliser un ensemble de sites et d'EnR variés pour faire face au poids et à la multiplicité des sollicitations de charge. La production non locale permet d'alimenter différents lieux de charge comme les parkings sur les voies publiques où un couplage local pourrait être non efficace du fait des configurations géographiques particulières. Ainsi, sans innovations particulière sur la collecte et le stockage d'énergie, l'alimentation des parkings publics en voie ouverte ne semble pas se prêter à un couplage local. Certains points de concentration de stationnement pourraient faire l'objet d'un couplage local spécifique en fonction des trajectoires de mobilité des usagers notamment dans les

²⁴ CRE, août 2019, L'importance de la flexibilité de la demande pour la gestion du système électrique, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=flexibilite-demande-systeme-electrique>

espaces périurbains sur des parkings publics ou privés près des hubs de transport ou près de centres commerciaux dans une optique de charge visant à compenser la dépense énergétique du déplacement individuel vers et à partir de ces hubs. Les configurations favorables à un couplage non local sont plus diversifiées car les bornes peuvent être installées dans tous les espaces où la densité des véhicules électriques le requiert sans nécessité d'être compatible avec des espaces où la production d'EnR est simultanément possible. De ce fait, le couplage non local a un plus grand potentiel d'intégration de tous les types d'EnR et notamment de l'énergie éolienne.

1.5. Les différents types de couplage

L'intérêt du couplage repose sur le potentiel de synchronisation des charges avec la production d'électricité d'origine renouvelable étant donné le niveau de consommation présent sur le réseau considéré. Plus que la consommation, c'est le niveau de consommation net de la production d'énergie renouvelable qui est pertinent au niveau de la boucle locale. En effet, les charges des véhicules électriques contribuent à la demande d'énergie comme d'autres sources de demande telles que les consommations de bâtiments à usage professionnel, commercial ou d'habitat. L'intérêt du couplage dépend donc de la capacité à mobiliser à un moment donné des sources de consommation pour absorber la production d'énergie renouvelable excédentaire, dont la charge des véhicules électriques. Le potentiel du couplage est fortement dépendant des configurations territoriales, de la forme de la courbe de charge de la demande qui en découle et du potentiel lié à l'appel à des flexibilités de la demande. La variété des situations nécessite de distinguer plusieurs types de couplages en fonction de la nature et de la valorisation des opportunités de flexibilité.

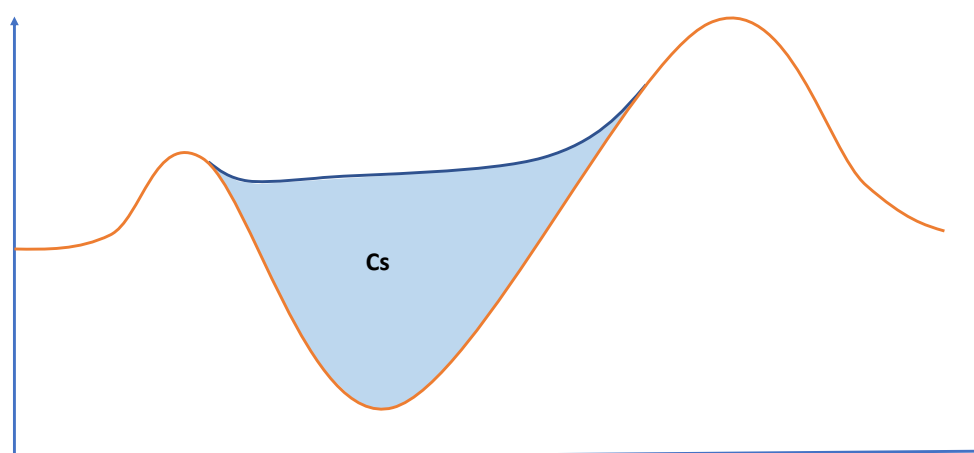


Figure 1 : Courbe de charge nette et couplage spontané

Dans la figure 1 la courbe de charge nette de la production locale d'EnR est décrite par la courbe orange. La partie bleue de la courbe représente la consommation qui se serait exprimée s'il n'y avait pas eu d'injection d'électricité issue des EnR sur le réseau. De ce fait la surface entre la partie bleue de la courbe et la partie orange représente le couplage effectif des consommations, dont les charges de véhicules électriques effectuées durant cette période. Ceci amène à considérer une première configuration de couplage qui n'est pas directement associée à une flexibilité de la demande : Le couplage spontané.

Le couplage spontané : La courbe de charge de la consommation locale prévue pourrait être telle qu'en tout moment l'énergie consommée soit supérieure à celle de la production d'électricité issue d'origine renouvelable. Le couplage est alors spontanément réalisé car il n'existe pas de production d'électricité EnR excédentaire. Dans cette configuration, il y a une synchronisation de la consommation et des charges avec la production d'EnR, mais la question de l'affectation de l'électricité d'origine renouvelable à la consommation courante ou aux charges présentes durant cette période reste ouverte.

Étant données la nature intermittente des énergies renouvelables et la forme particulière des courbes de charges de la consommation locale selon la nature des activités sollicitant le réseau, il se peut qu'un surcroît de production d'électricité issue des EnR apparaisse localement. Cette situation est appelée sans doute à se produire plus fréquemment du fait du développement des projets de production d'électricité par des EnR décentralisés. Ceci amène à considérer des configurations plus complexes identifiées dans la figure 2.

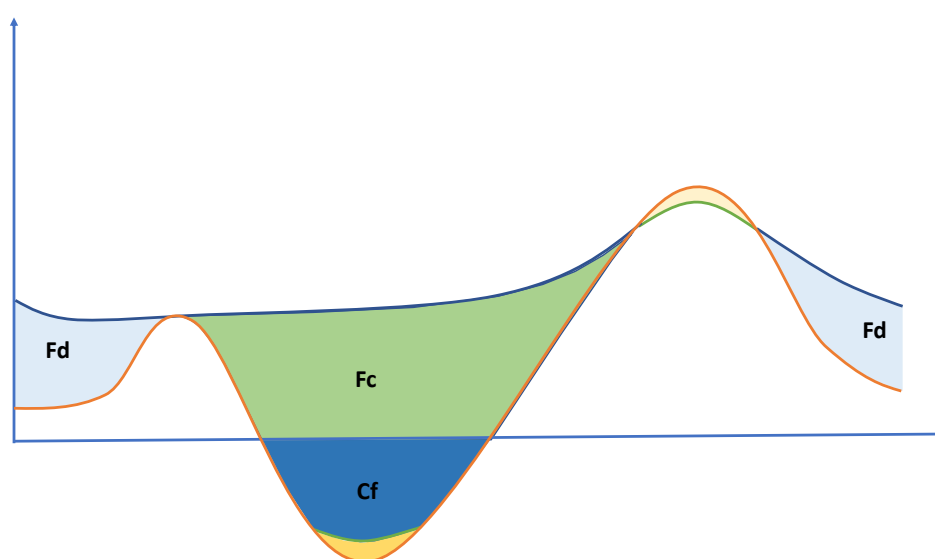


Figure 2 : Courbe de charge nette, couplage et flexibilité des charges

Le couplage fort : Dans une situation de production excédentaires d'EnR sur une maille locale, il peut être intéressant de faire appel à de la flexibilité de la demande pour améliorer le couplage et limiter l'injection nette dans le réseau. Nous serons en présence de couplage fort lorsque des charges de véhicules électriques sont pilotées ou des flexibilités sont sollicitées pour être synchronisées avec une période de production excédentaire d'électricité issue d'EnR. Le couplage fort dont le potentiel est décrit par l'aire bleu foncé (Cf) sur la figure 2 est un cas particulier de la flexibilité de la demande d'électricité qui repose sur une synchronisation en puissance. Le déplacement des charges des véhicules électriques lors d'une production excédentaire d'électricité issue d'EnR crée des bénéfices sur le réseau, mais peut aussi améliorer la rentabilité de la production d'EnR en évitant d'écarter des productions ou en limitant les coûts de raccordement. Dans cette configuration et contrairement au couplage spontané, les charges présentes durant ces périodes peuvent alors être considérées comme couvertes en totalité par de l'électricité d'origine renouvelable.

La flexibilité couplée : il existe des situations où une plus grande synchronisation des charges des VE avec la production d'électricité issue d'EnR peut être un élément de mise en œuvre de la flexibilité de la demande qui contribue à améliorer l'insertion

de la charge des véhicules électriques dans le réseau (localement ou non). La flexibilité des charges des véhicules électriques est un élément de la flexibilité de la demande d'électricité qui peut représenter un potentiel non négligeable car le parc des véhicules électriques est amené à croître significative et qu'un grand nombre de véhicules reste stationné suffisamment longtemps pour permettre un pilotage des charges qui puisse répondre à des besoins aux différentes mailles du réseau électrique. Ainsi, selon la configuration de l'offre et de la demande nettes locales le potentiel de valorisation de la flexibilité des charges peut aussi se trouver dans les périodes de disponibilité des énergies renouvelables, comme identifiée par l'aire verte (Fc) sur la figure 2. Dans cette configuration, la synchronisation des charges pilotées des véhicules électriques avec la production d'électricité issue d'EnR au niveau local s'effectue sans présence de production EnR excédentaire. Cette flexibilité couplée des charges des véhicules électriques durant les périodes de production d'électricité issues d'EnR peut provenir d'un intérêt exprimé au niveau du réseau général, notamment pour des problématiques de flexibilité à la baisse. Il peut se justifier plus localement selon les configurations afin de favoriser l'autoconsommation individuelle ou collective. Dans les périodes de flexibilité couplée, la charge des véhicules électriques et la consommation présente sur la maille locale sont en concurrence pour être couverte par la production d'électricité d'origine renouvelable.

Le couplage prioritaire : Les configurations de couplage précédemment présentées reposent sur une synchronisation des charges des véhicules électriques avec la production d'électricité issue d'EnR. Cette synchronisation permet un couplage en puissance qui, sur une maille locale, permet de rendre des services au-delà de l'aspect plus vertueux du mix électrique consommé. Si pour le couplage fort, l'attribution des charges flexibles à la résorption de l'excédent de production d'électricité conduit implicitement à un mécanisme équivalent à une garantie d'origine, ce n'est pas forcément le cas pour le couplage spontané ou la flexibilité couplée. Les périodes de couplage spontané ou de flexibilité couplée posent la question de l'attribution de la production d'électricité d'origine renouvelable à la couverture totale ou partielle de la charge des véhicules électriques en lieu et place d'autres sources de consommation d'électricité. Le couplage prioritaire peut prendre la forme d'un ordre de mérite dans les consommations ou de certificat de couplage local qui permette de garantir que la charge a été faite en partie ou en totalité par de l'électricité d'origine renouvelable produite localement et simultanément. L'intérêt d'un couplage prioritaire sur les charges peut provenir d'une configuration locale du réseau qui favorise une autoconsommation qui ait une valeur symbolique ou une logique pour l'utilisateur car la production d'EnR se trouve visible sur le site de charge (ombrières de parking photovoltaïque). Le couplage prioritaire peut aussi se justifier dans le cadre de la généralisation du V2G pour du stockage d'EnR et de sa restitution sur d'autres périodes plus propices à la valorisation économique et environnementale de ces productions via des mécanismes individualisés et locaux ou via des mécanismes d'agrégation. Dans ce dernier cas, des services réseaux peuvent aussi être associés à l'injection d'électricité par les véhicules électriques, mais le fait que l'électricité provienne d'origine renouvelable ou non n'est pas forcément requise.

Flexibilité découplée : Le couplage spontané ou la flexibilité couplée, n'épuisent pas forcément le gisement de charges flexibles. Il peut aussi exister des arbitrages qui poussent à affecter des charges flexibles en dehors des périodes de production d'EnR ou durant des périodes de faible production d'EnR. La flexibilité découplée est matérialisée par l'aire bleu clair (Fd) sur la figure 2. Dans ce cas, des arbitrages

standards de flexibilité de la demande guident la répartition des charges flexibles selon des opportunités locales ou globales selon différents motifs d'appel à la flexibilité.

2. ANALYSE COMPAREE DES PROJETS DE COUPLAGE

Les opportunités de couplages dépendent grandement des configurations territoriales liées aux ressources renouvelables disponibles, à l'équipement du réseau électrique, à la couverture du réseau de bornes, au type de territoire et aux mobilités qui s'y expriment. Définir des opportunités de couplage est une tâche difficile du fait de cette multiplicité de situations. Il est donc intéressant de se pencher sur les différents projets qui ont pu être lancés en Europe afin d'avoir une idée des modalités de couplage qui ont été testées et des retours d'expérience qu'il est possible d'en faire.

La base de données que nous avons pu constituer contient un total de 38 projets, dont 30 font partie de la base de données Smart Grid Outlook 2017 du Joint Research Center (JRC)²⁵, 4 projets supplémentaires ont été identifiés dans des bases de données telles que CORDIS, la CRE et 4 projets ont été trouvés dans la région Sud. Le tableau 1 regroupe la liste des projets, la source d'identification et le lieu de développement.

Nom des Projets	Pays	Source
3E MFH	ALLEMAGNE	JRC
Ashton Hayes Smart Village	ROYAUME-UNI	JRC
BeMobility 2.0	ALLEMAGNE	JRC
BESIC	ALLEMAGNE	JRC
BienVEnu	FRANCE	JRC
Charge stands	DANEMARK	JRC
ColognE-mobil	ALLEMAGNE	JRC
Demand Response	ALLEMAGNE	JRC
DER-IREC 22@Microgrid	ESPAGNE	JRC
Dutch Smart Charging	PAYS BAS	JRC
eAutarke Zukunft	ALLEMAGNE	JRC
e-carPark	ALLEMAGNE	JRC
Electric vehicles and renewable energy in the transport sector - consequences including the interaction with the power and CHP system	DANEMARK	JRC
EMiLippe	ALLEMAGNE	JRC
Evergreen	DANEMARK	JRC
GeoGreen	BELGIQUE	JRC
GL V2.0	ALLEMAGNE	JRC
Greening European Transportation Infrastructure for Electric Vehicles	DANEMARK	JRC
iGIVE	ROYAUME-UNI	JRC
DA-Li	PAYS BAS	JRC
INTELLAN	ALLEMAGNE	JRC
Isernia	ITALY	JRC
iZEUS	ALLEMAGNE	JRC

²⁵JRC, 2017, <https://ses.jrc.ec.europa.eu/smart-grids-observatory>

Large-scale demonstration of charging of electric vehicles	DANEMARK	JRC
Mini E-Berlin powered by Vattenfall	ALLEMAGNE	JRC
Novel E-MObility Grid Model	ALLEMAGNE	JRC
SEM	AUTRICHE	JRC
Smart Grid in Balans	PAYS BAS	JRC
SMARTWAVE	FRANCE	JRC
Well2Wheel	ALLEMAGNE	JRC
SMAC	FRANCE	RECHERCHE
Lyon Smart Community	FRANCE	RECHERCHE
WE DRIVE SOLAR	PAYS BAS	CORDIS
SEEV	PAYS BAS	RECHERCHE
BARATIER	FRANCE	RÉGIONAL
SAP Laps	FRANCE	RÉGIONAL
TGV Aix en provence	FRANCE	RÉGIONAL
SOLAR CAMP	FRANCE	RÉGIONAL

Tableau 1 liste des projets identifiés

L'analyse a été réalisée en prenant en compte de trois axes principaux :

1. **Le lieu de chargement du véhicule** : Le couplage des Énergies Renouvelables (EnR) et du Véhicule Électrique (VE) diffère selon le lieu de chargement, 14 emplacements de chargement différents ont été définis :

- Parking de surfaces commerciales
- Bâtiments tertiaires
- Parking d'entreprise
- Entrepôts
- Maison individuelle
- Copropriétés
- Habitat collectif (mono propriétaire)
- Dépôt de transport en commun (bus)
- Parking Aéroport
- Parking de gares
- Parking relais
- Parking aire d'autoroute ou station de service
- Station-service en ville
- Parking public (de rue)

Ces lieux ont été définis selon une analyse de la base de données de sites de couplage potentiels local et non local. Chaque lieu fait référence à un contexte de recharge différent, au niveau social, économique et technique.

2. **Le type de véhicule électrique** : six types de véhicule ont été retenus pour faire l'analyse :
 - 2 roues : Véhicules de 2 roues comme le vélo électrique, la moto, le scooter entre autres véhicules avec un moteur électrique.
 - Flotte de véhicules VP : Flote de véhicules personnelles comprend le parc de véhicules appartenant à

l'entreprise mis à la disposition des employés à des fins personnelles ou professionnelles.

- Flotte de véhicules utilitaires : Voiture commerciale, camionnette, fourgonnette ou fourgon destinés au transport des marchandises ou des personnes.
- Véhicule individuel : véhicule particulier destiné à un usager généralement personnel
- Véhicule de transport en commun : Véhicule de transport destiné à transporter plusieurs personnes ensemble sur un même trajet.
- Flotte de camions : Véhicule de grande taille destiné au transport de marchandises.

Ces types de véhicules ont été sélectionnés en fonction de l'analyse de la base de données et en tenant compte des modalités de déplacement de ces véhicules sur de longues et courtes distances.

3. Types de couplage des EnR et VE : Afin d'établir les critères de couplage, des aspects techniques, économiques et sociaux ont été pris en compte. La sélection des critères provient de l'analyse de la totalité des projets de base du JRC, en identifiant les aspects communs nécessaires à la réalisation de ce couplage. Cette analyse a permis d'identifier 4 axes importants :

- Énergie utilisée : Le premier axe comprend le type d'énergie renouvelable utilisé pour le couplage (énergie photovoltaïque, énergie éolienne, énergie hydraulique et un mix d'énergies renouvelables lorsque la source d'énergie n'est pas clairement définie).
- Smart Charging : Cet axe comprend tous les éléments nécessaires pour envisager une recharge intelligente du véhicule. Des dispositifs tels que la cogénération d'énergie pour maximiser le système de couplage, le stockage d'énergie avec une batterie fixe, le couplage local ou non local, le transfert d'énergie du réseau vers le véhicule V1G, l'intégration de la technologie vehicle-to-grid V2G, une centrale virtuelle et tous les dispositifs de pilotage ont été considérés.
- Type d'usage : comprend les différents types d'usage que peut avoir le véhicule. Nous avons considéré, le covoiturage, l'autopartage, l'usage individuel, l'usage collectif, la location, l'usage professionnel.
- Charge et type de véhicule : Cette catégorie contient les aspects de vitesse de charge, le type de station de charge, la taille du véhicule en fonction de la taille de sa batterie et du type de véhicule (hybride ou rechargeable).

À partir de la définition des critères, une analyse de corrélation de ceux-ci a été réalisée pour établir les points communs. Un document d'analyse complémentaire qui rassemble les informations recueillies des différents projets selon ces critères a

été réalisé dans le fichier "Outil de Benchmark.xls". L'analyse de cette base de donnée est fournie dans les paragraphes suivants.

2.1. Expériences de couplage européennes et régionales

Cette section analyse les 38 projets enregistrés dans la base de données de référence. Comme les projets expérimentent différents scénarios de chargement et de couplage les résultats ne sont pas forcément généralisables, mais ils proposent des premières pistes sur la manière dont le couplage est développé.

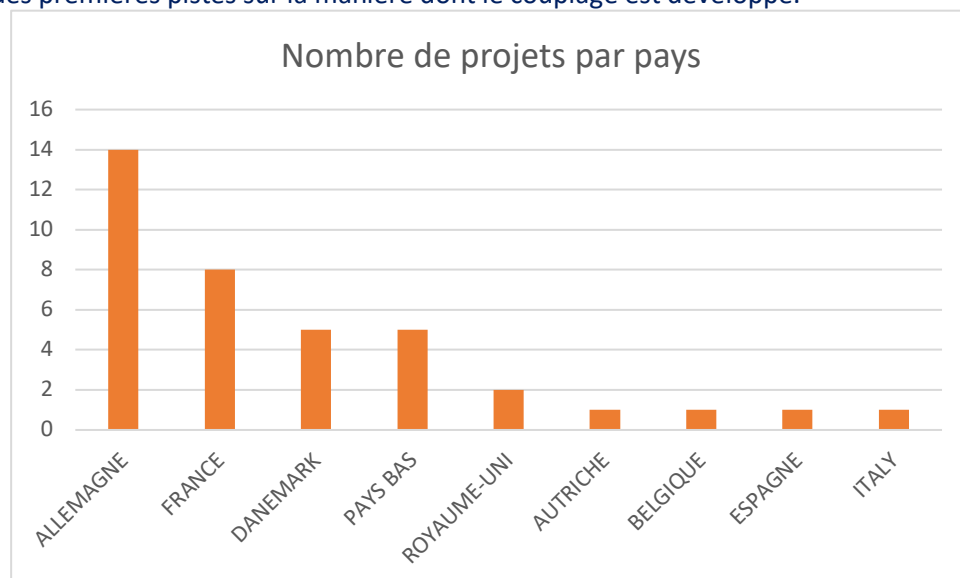


Figure 1, nombre de projets par pays

Comme le montre la figure 1, l'Allemagne compte le plus grand nombre de projets déclarés dans la base de données du fait de la réponse à un appel à projets pour le couplage de la mobilité électrique et les énergies renouvelables lancé par le Ministère Fédéral Allemand de l'Environnement et Le Ministère de Transports. Le Danemark et les Pays-Bas comptent 5 projets. La France compte huit projets dans notre base dont 4 se trouvent dans la région SUD.

Si nous observons la figure 2, nous remarquons que 30 projets proviennent de la base de données JRC Smart Grid, 4 proviennent d'une identification régionale et 4 de recherches complémentaires.

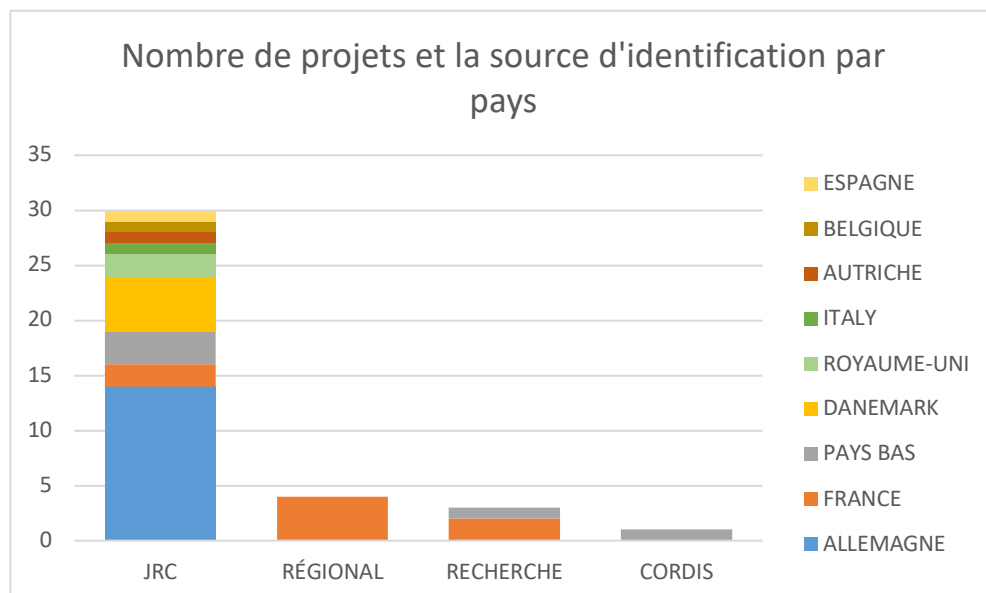


Figure 2, Nombre de projets et source d'identification par pays

Nous avons identifié 1 projet Néerlandais a travers CORDIS (The Community Research and Development Information Service), et 3 projets identifiés ultérieurement.

La figure 3, montre que la plupart des expériences ont été réalisées dans des maisons individuelles. C'est le scénario de recherche de couplage le plus commun pour plusieurs raisons.

La maison individuelle, semble un domaine propice puisque qu'il favorise certains aspects techniques tels que le pilotage de la recharge. La maison est un système fermé permettant de mieux déployer le système de gestion de l'énergie en contrôlant d'autres aspects de consommation individuelle en plus à la recharge du véhicule. Il est ainsi plus facile d'avoir un couplage local et de mieux gérer la consommation générale de l'ensemble du système. Seul le propriétaire de la résidence intervient et il est le mieux placé pour juger de l'intérêt d'avoir une installation d'EnR (plutôt photovoltaïque) et un véhicule électrique. Ainsi les informations nécessaires à la formulation du choix sont plus faciles à obtenir que dans un système où plusieurs utilisateurs et propriétaires interviennent.

De plus, les aides financières publiques pour l'installation de panneaux photovoltaïque pour les particuliers encouragent la production locale et permettent au propriétaire de bénéficier de l'autoconsommation ou de la vente du surplus d'électricité produite.

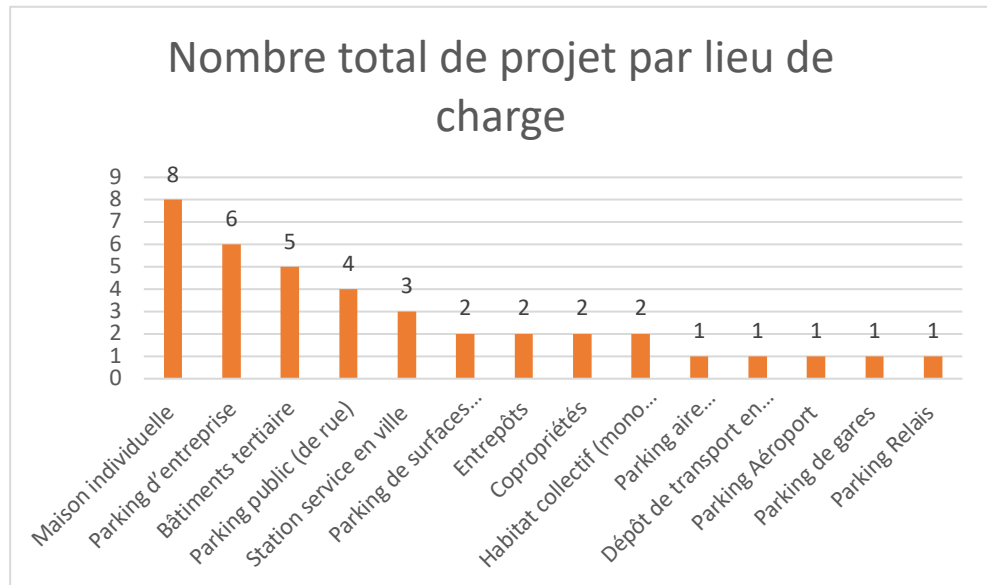


Figure 3, nombre total de projet par lieu de charge

Le parking d'entreprise et le bâtiment tertiaire sont les deuxièmes et troisièmes modalités de charge des véhicules. Ce résultat est logique car les véhicules passent la plupart du temps en stationnement sur le lieu de résidence ou sur le lieu de travail. Il y a donc une cohérence dans le fait de retrouver les stations de charge où il y a une concentration de véhicules électriques stationnés.

Nous pouvons apercevoir que les expériences sont moins fréquentes dans les espaces ouverts ou publics tels que les parkings des gares, les parkings d'aéroports, les parking d'autoroutes. Cela peut correspondre à la difficulté de pilotage et de contrôle de tels projets dans ces espaces.

Le type de véhicule le plus utilisé pour les expérimentations sont les véhicules individuels (figure 4), alors que les véhicules de transport en commun représentent seulement 1 projet d'expérimentation. Ces résultats montrent l'intérêt porté à la mobilité individuelle électrique vue comme une alternative à la mobilité individuelle thermique. Les transports en commun sont aussi un secteur spécifique où le déploiement des véhicules électriques représente moins d'enjeux de recherche et d'expérimentation.

Les flottes de véhicules particuliers en milieu professionnel représentent un nombre significatif de projets. Ce type de véhicule a des avantages du point de vue de l'obtention de données car les voitures sont normalement opérées au travers de systèmes de gestion informatisés qui permettent de recueillir de nombreuses informations sur l'état du véhicule ainsi que sur l'état de charge. La gestion des données par les projets est un facteur important car c'est l'exploitation des données qui permet d'optimiser les systèmes de chargement et les performances du véhicule.

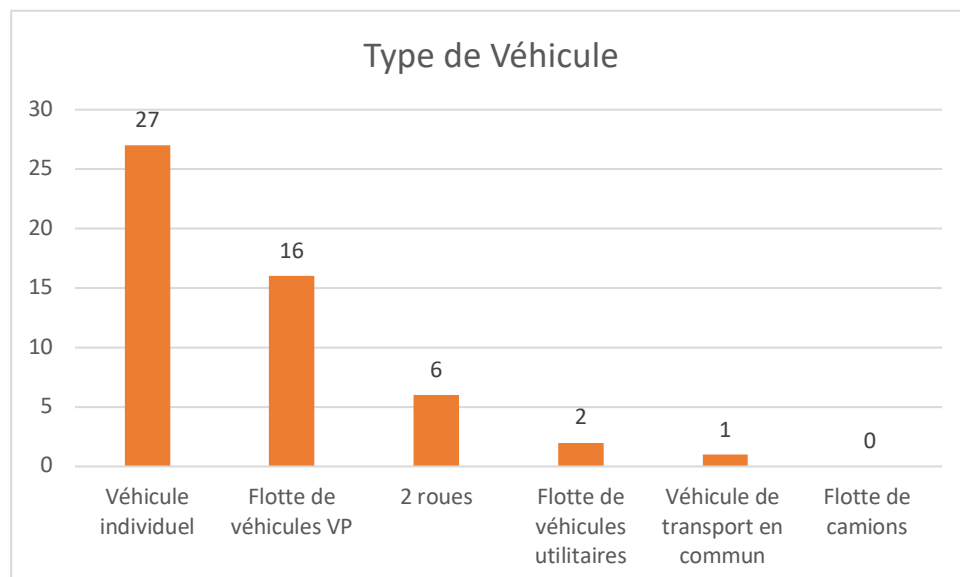


Figure 4. Nombre de projets par type de véhicule

Même s'il y a 6 projets qui prennent en compte les véhicules à 2 roues, les expérimentations sont plus orientées vers la recharge de voitures. Les véhicules à 2 roues sont plutôt considérés dans les projets comme une opportunité complémentaire à la mobilité électrique et se focalisent principalement sur le vélo électrique.

Finalement, si nous analysons les sources d'énergie utilisées pour les charges (figure 5), le couplage est principalement opéré à partir de l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques. Les aides publiques à l'installation de panneaux solaires chez les propriétaires peuvent expliquer la facilité de déploiement de telles expérimentations. Les panneaux photovoltaïques sont aussi plus accessibles pour une installation locale et peuvent mieux se conformer aux différentes surfaces disponibles et aux niveaux différenciés des besoins.

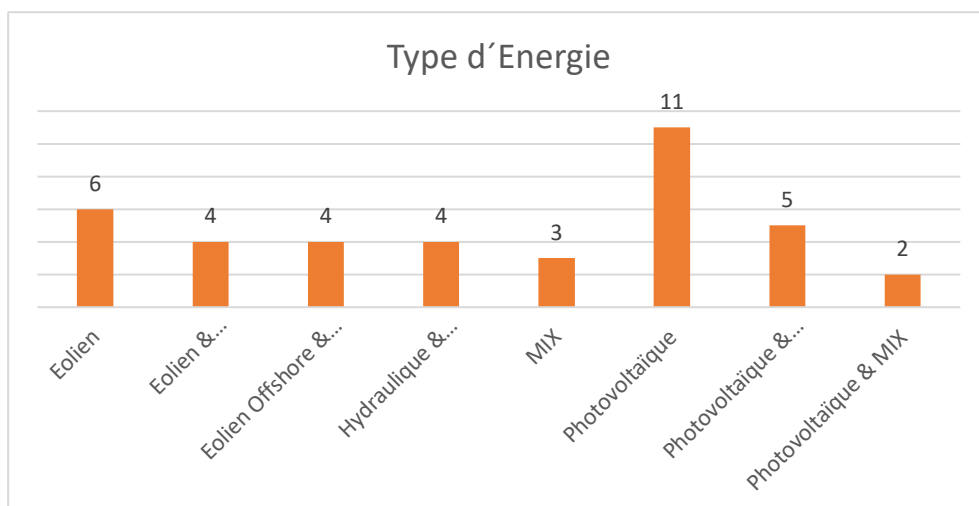


Figure 5. Source d'énergie renouvelable

Ce graphique montre aussi que les énergies renouvelables sont parfois combinées. La combinaison la plus fréquente est celle qui associe l'énergie éolienne et le photovoltaïque qui sont les énergies renouvelables les plus fréquemment rencontrées dans les projets. Selon les projets l'importance de l'une et de l'autre varie.

L'énergie hydraulique, n'est pas une source d'énergie utilisée pour les expérimentations de couplage avec la charge des véhicules électriques au niveau européen. Ceci peut s'expliquer car cette source renouvelable est souvent exploitée de manière centralisée, son exploitation dans le cadre des expérimentations est souvent couteuse. De plus, l'utilisation du pompage dans les STEP ne permet pas forcément de garantir l'origine renouvelable de l'énergie hydraulique ainsi générée. Une première approche des résultats ayant été faite, il semble intéressant d'étudier les relations entre les lieux de charge et les types de véhicules et les énergies utilisées afin d'avoir une idée plus précise des principales modalités de couplage.

- **Lieu de charge et type de véhicule**

La figure 6 dévoile les relations entre le lieu de charge et le type de véhicule. Selon cette figure c'est le véhicule individuel qui prédomine sur les autres types de VE, avec 52% d'utilisation. La majorité s'intègre dans des expérimentations dans des maisons individuelles. Les véhicules particuliers de flotte de véhicule professionnels sont présents dans 31% des projets avec des charges opérées à la fois dans les parkings d'entreprises et les maisons individuelles. Ces projets permettent ainsi d'avoir une idée des comportements de charge des populations faisant des navettes domiciles travail.

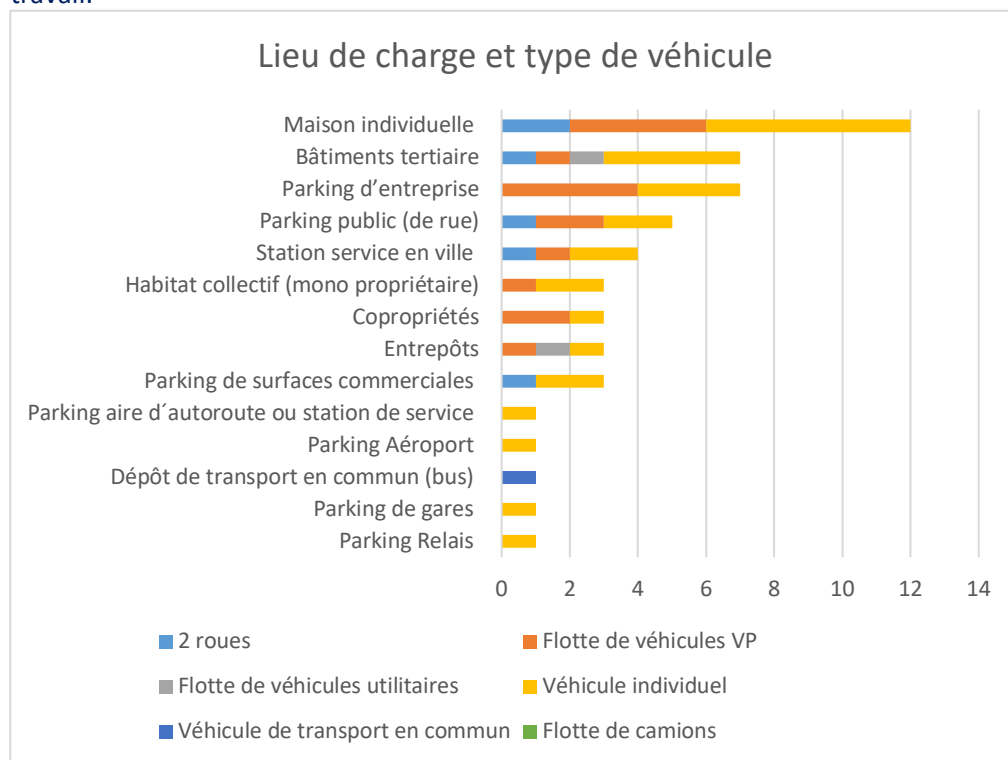


Figure 6. Lieu de charge et type de véhicule.

La prédominance des véhicules individuels vient sans doute du fait qu'ils ont la capacité à se charger sur de nombreux lieux de charge. 13 des 14 lieux de charge proposés dans les projets ont testé la charge des véhicules particuliers. Les véhicules à 2 roues ont aussi une opportunité de couplage considérable, car ils ont une taille de batterie avec moins capacité que les autres, et ne nécessitent pas de grands investissements en infrastructure de charge. Toutefois, l'attrait pour des expérimentations sur ces véhicules est moins présent.

De tous les lieux de charge c'est le bâtiment tertiaire qui se prête à la charge de la plus grande variété de véhicules (2 roues, flotte de véhicule VP, véhicules utilitaires, véhicule particulier).

Ces résultats permettent de confirmer les premières approches en relation au lieu de charge. Tout d'abord les maisons individuelles sont plus présentes dans les expérimentations que les habitats collectifs ou les copropriétés. Cela peut s'expliquer par la difficulté d'élaborer un projet de couplage en collectif du fait de la diversité des parties prenantes et de leurs intérêts parfois divergeants.

Le lieu de travail apparaît comme un point clé de recharge du véhicule car les bâtiments tertiaires et les parkings d'entreprises accueillent une grande partie de la population active et, les voitures restent la plupart de la journée en stationnement. Ces lieux présentent une certaine stabilité ou prévisibilité des charges avec une unicité de décision sur les aménagements.

Les modalités de charge qui couvrent la demande de services des utilisateurs durant leur trajectoire de mobilité sont nettement moins fréquente dans les projets et rassemblent les stations-services en ville et sur autoroutes, les parkings publics sur voie ouverte, les parkings de gares, d'aéroports ou de centres commerciaux.

- Le lieu de charge et type d'énergie, couplage local et non local

La source d'énergie et le lieu de charge, jouent un rôle important car ils déterminent la possibilité d'un couplage local ou non local. La figure 7 montre que le solaire photovoltaïque est le plus testé dans les expériences, avec une présence de 53% dans les projets concernant les maisons individuelles et les bâtiments tertiaires. L'énergie photovoltaïque est présente soit au niveau de la recherche ou au niveau de l'expérimentation dans 10 lieux de charge sur 14.

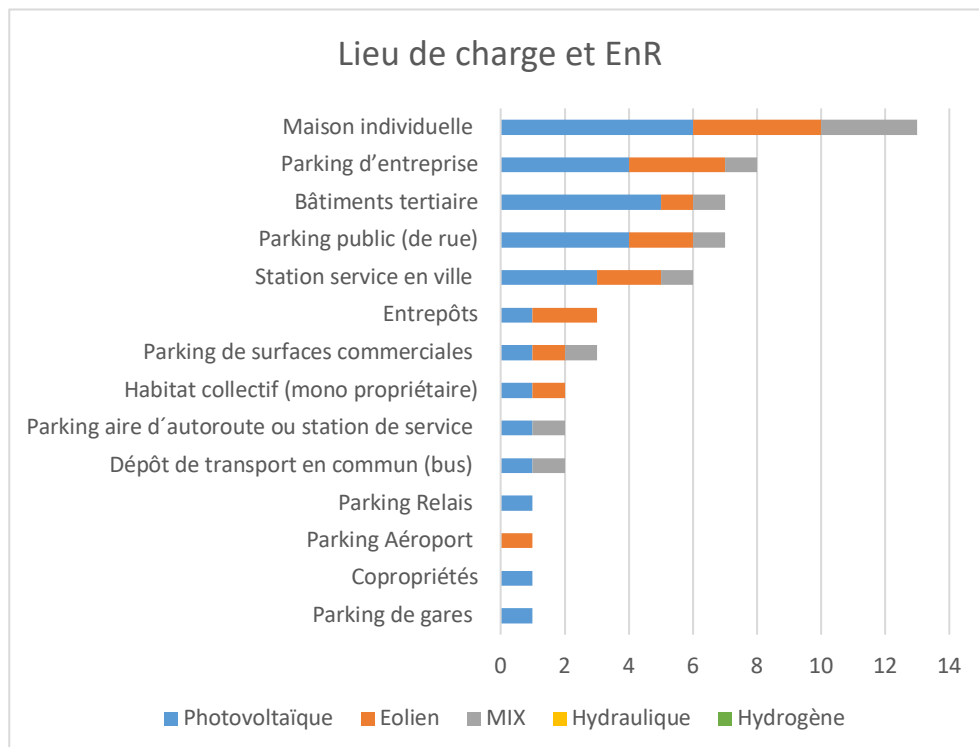


Figure 7. Lieu de charge et source d'énergie renouvelable

L'énergie éolienne apparaît dans 30% de l'ensemble des projets, mais également dans 10 lieux de charge.

Pour préciser les conditions de couplage il est possible de déterminer s'il s'agit d'un couplage local ou non local. La figure 8 montre que la plupart des projets avec de la production d'énergie photovoltaïque repose sur un couplage local. Dans le cas de l'énergie éolienne, seul un projet correspond à un couplage non local qui se situe dans le port d'Hambourg.

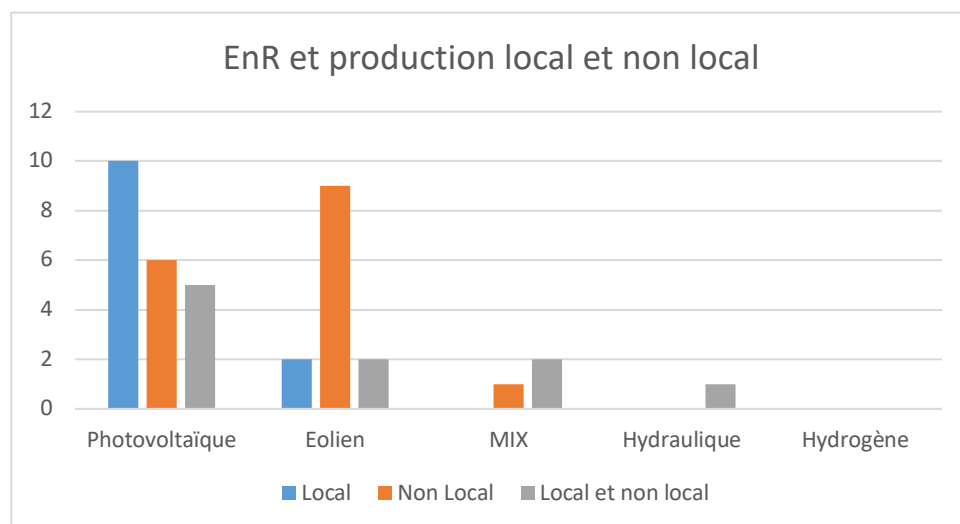


Figure 8. EnR et production locale et non locale

Il est nécessaire aussi de souligner que certains projets ne passent pas de la recherche scientifique à l'expérimentation et se concentrent uniquement du point de vue théorique sur l'insertion des énergies renouvelables dans différents systèmes énergétiques.

Dans la figure 8, un seul projet utilise de l'énergie hydraulique. Ce projet est lié à un couplage local et non local car il intègre également de l'énergie solaire produite localement (projet italien Isernia géré par ENEL).

- **Types d'usage**

En ce qui concerne le type d'utilisation en fonction du lieu de charge (figure 9), on constate que l'utilisation du véhicule individuel prédomine avec 67% tout au long des expériences, suivie de l'utilisation de dispositifs d'autopartage avec une présence de 20%. Le véhicule individuel est le véhicule qui répond le mieux à l'usage individuel, comme le véhicule à deux roues.

Dans le cas de l'autopartage, les maisons individuelles, les parkings d'entreprises et les copropriétés, sont les lieux d'expérimentation des charges des VE correspondant à cet usage, avec l'utilisation de véhicules particuliers issus de flottes de véhicules (figure 10). En effet, le cadre professionnel est sans doute plus favorable à de telles expérimentation du fait de la possibilité d'acquérir plus facilement les données sur les mobilités.

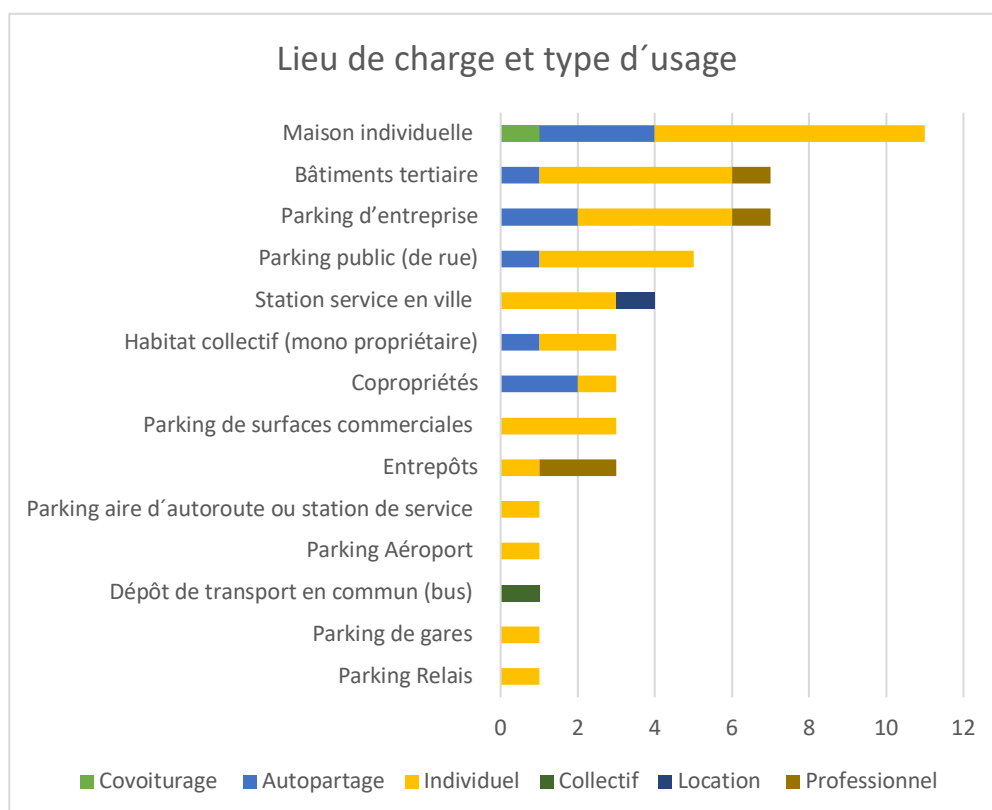


Figure 9. Lieu de charge et type de d'usage

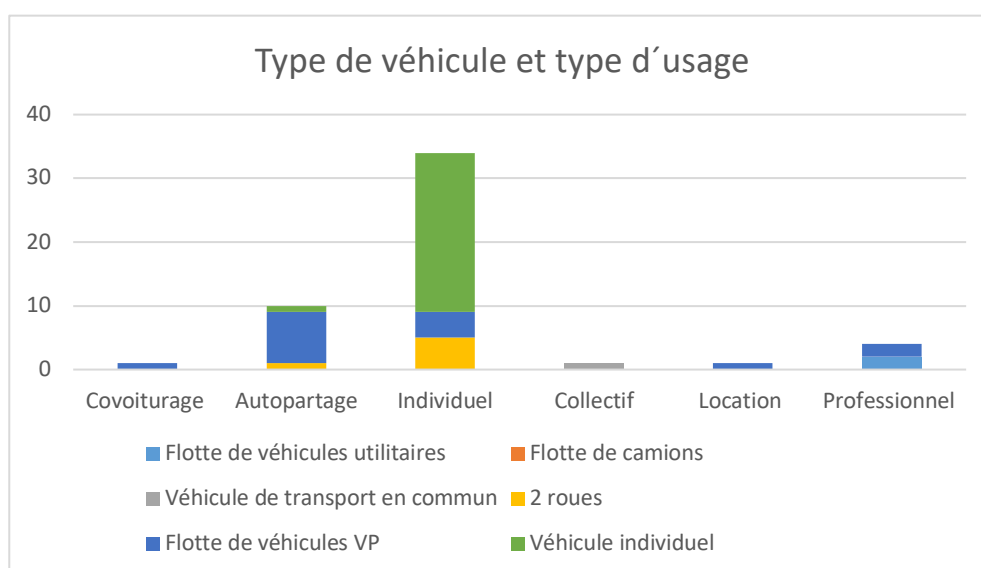


Figure 10. Type de véhicule et type d'usage

Très peu de projets sont développés autour d'usages collectifs comme le transport en commun, la location de véhicules et le covoiturage. Le couplage des énergies renouvelables se trouve plus facilement dans une mobilité partagée grâce à l'autopartage. Cela peut s'expliquer car l'autopartage est un moyen d'amortir plus rapidement le coût du véhicule et d'augmenter son taux d'utilisation qui est aussi le garant de l'amélioration de son bilan environnemental par rapport au véhicule thermique lorsque les charges sont couplées à de la production d'EnR.

- [Smart Charging](#)

La recharge intelligente est une technologie qui devient nécessaire pour augmenter l'efficacité du couplage. Toutefois, cette considération est plutôt récente car c'est uniquement à partir de 2009 que les projets commencent à intégrer des dispositifs de Smart Charging. Les projets commençant en 2017, considèrent la recharge intelligente comme un élément de couplage essentiel (Figure 12).

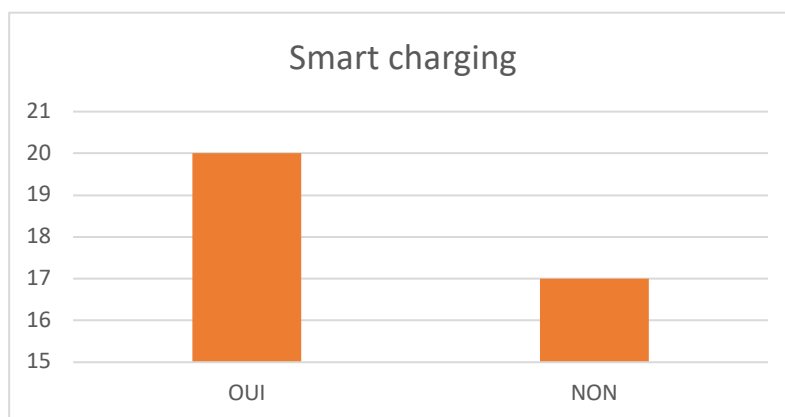


Figure 11. Nombre de projets avec smart charging

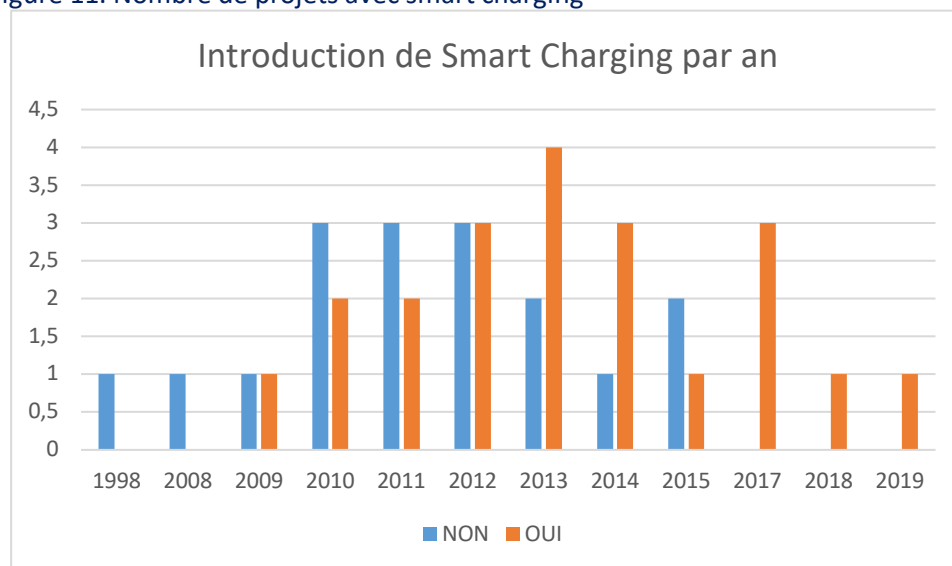


Figure 12. Introduction du concept de recharge intelligente par date de début du projet

Au fur et à mesure que la technologie avance, la recharge intelligente devient nécessaire pour optimiser la charge du véhicule avec la production réelle d'EnR. La recharge intelligente est plutôt présente dans les lieux où il est possible d'avoir le plus grand contrôle de la charge du véhicule, tels que les parkings d'entreprises, les copropriétés, les maisons individuelles et les entrepôts. Un cas particulier est le couplage sur un parking public en rue qui regroupe 2 projets qui cherchent à intégrer une recharge intelligente pour intégrer une part plus grande d'énergie renouvelable dans la recharge.

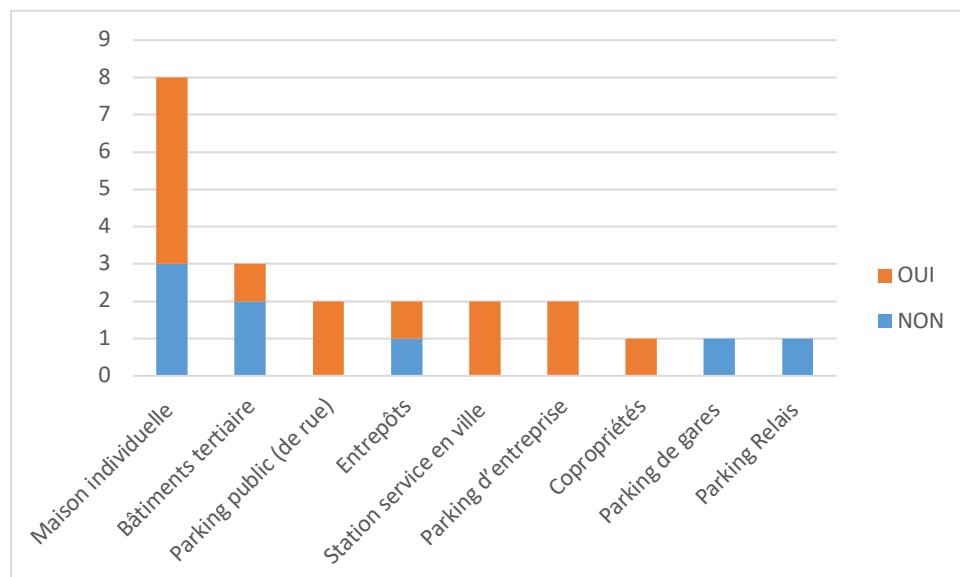


Figure 13. Smart charging selon le lieu de charge

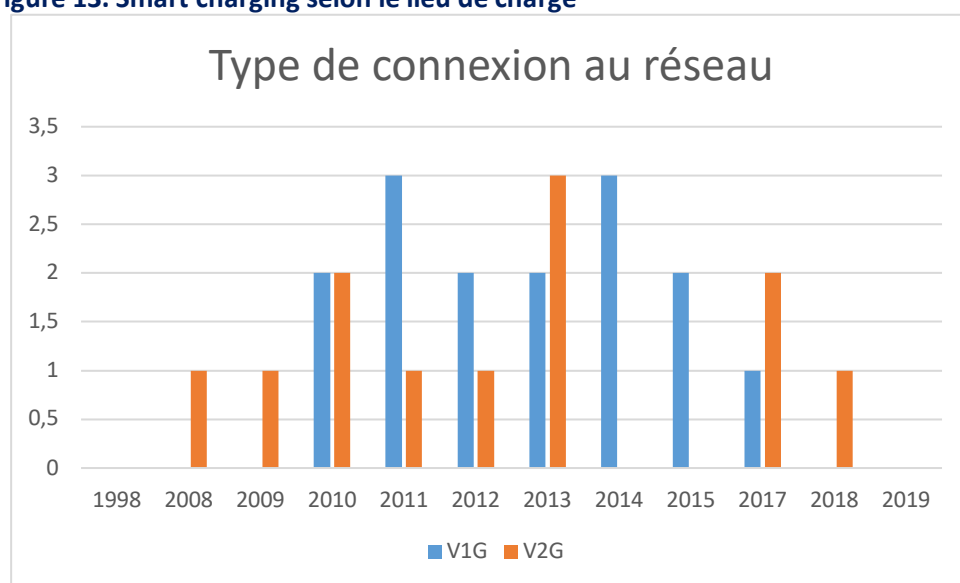


Figure 14. Type de connexion au réseau

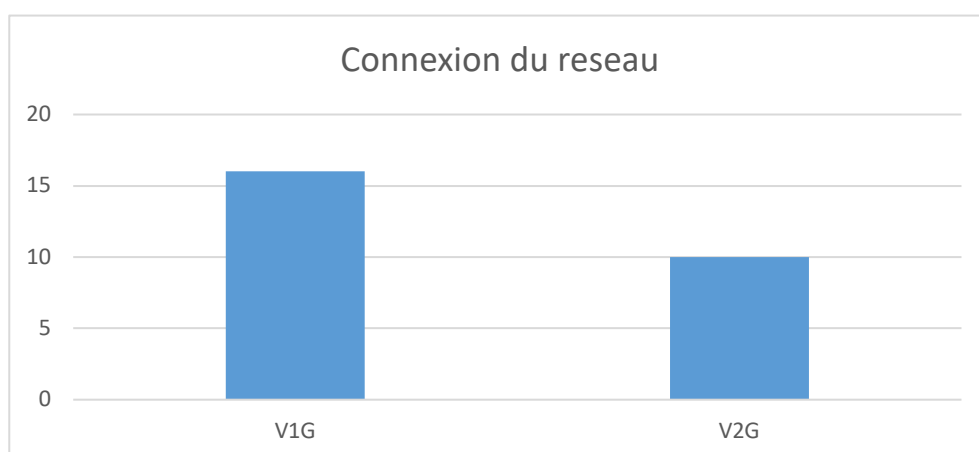


Figure 15. Connexion V1G ou V2G

La possibilité d'utiliser la technologie V2G est aussi présente notamment en tant qu'élément d'amélioration de la performance en utilisant le système de stockage du véhicule pour fournir des services sur les réseaux locaux.

Cependant, dans certains projets, le V2G ne dépasse pas le stade de la recherche, l'expérimentation est encore faible. Le V2G est une technologie qui nécessite encore une maturation et il y a encore peu de véhicules et de bornes permettant de telles expérimentations.

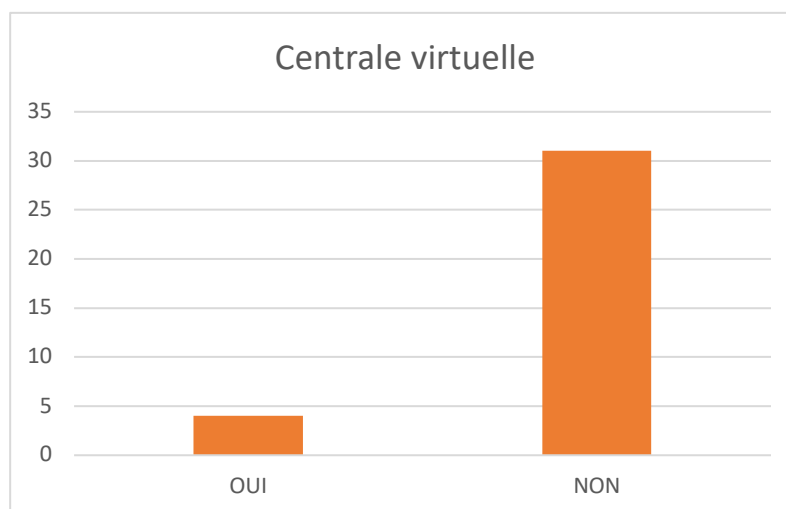


Figure 16. Nombre projets avec une centrale virtuelle

Enfin l'utilisation d'une centrale virtuelle comme un agrégateur de différentes sources d'énergies renouvelables pour recharger le véhicule électrique n'est pas très utilisée pour optimiser le couplage car cela représente un investissement majeur, demande une infrastructure spécifique et la présence de plusieurs sources d'EnR. Le projet Well2Wheel considère ainsi que le degré de maturité du marché et les coûts associés rendent l'installation d'une centrale virtuelle non rentable. Seulement 11% (figure 16) des projets utilisent une centrale virtuelle.

Après avoir analysé les caractéristiques de la mise en œuvre du couplage dans différents les différents projets, il est possible de mettre en évidence des configurations types selon les lieux de charge.

2.2. Modalités de couplage

Sur la base des informations collectées dans les différents projets, il est possible de reconstruire différentes modalités de couplage selon les lieux de charge. Ces distinctions selon les lieux de charge sont pertinentes car les conditions géographiques, sociales, techniques et économiques varient fortement et que les motifs et les séquences de mobilités et de stationnement changent aussi selon les lieux.

Il est possible d'identifier 4 types de lieux pour décrire les opportunités de couplage. Le premier concerne le lieu de résidence, le second le lieu de travail, le troisième un espace public ouvert à tout public et un quatrième un espace également public et privé mais avec un accès limité.

- **Modalité de couplage sur lieu de résidence**

Le lieu de charge correspond aux maisons individuelles, l'habitat collectif (mono propriétaire) et les copropriétés. Les opportunités de couplage diffèrent selon que le lieu de résidence est individuel ou collectif du fait de la maîtrise plus ou moins forte de la décision d'investir dans la mobilité électrique et dans l'équipement de charge.

Le couplage peut être local ou non local. Tous les projets disposent d'une connexion réseau à des sources d'alimentation régulières, afin de garantir la sécurité et l'approvisionnement en énergie.

Les projets centrés sur les lieux de résidence ont la particularité d'intégrer l'ensemble du système de consommation d'énergie, pour les autres besoins de la maison, tels que les appareils électriques, optimisant ainsi l'utilisation des énergies renouvelables avec ou sans batterie stockage stationnaire.

Les profils de charge dans les lieux d'habitation peuvent être définis en fonction de la composition locale et sociale des populations. La consommation d'énergie prédomine dans les habitations en fin de journée et la nuit, en particulier lorsque le véhicule arrive du travail. Cependant, les profils de charge peuvent varier en fonction des conditions sociales des personnes. Les retraités peuvent utiliser leur véhicule de façon plus fréquente et irrégulière pour des activités de loisirs.

Maison individuelle

Au sein de cette modalité de couplage, nous trouvons 8 projets au total :

- ColognE-mobil
- Réponse à la demande
- Microgrid DER-IREC 22 @
- eAutarke Zukunft
- À feuilles persistantes
- iZEUS
- Smart Grid à Balans
- Well2Wheel

Dans cette configuration, le couplage est davantage lié à la production d'énergie photovoltaïque. L'utilisation la plus récurrente correspond à une utilisation individuelle du véhicule. Dans cette modalité, l'utilisation d'un véhicule à deux roues et d'un véhicule particulier issu d'une flotte de véhicules sont également considérées et donnent des usages individuels assez différents.

Seuls 3 projets ont une batterie de stockage d'énergie stationnaire et un utilise la technologie V2G. L'intégration des échanges virtuels d'énergie et la recharge intelligente peuvent être plus facilement déployés dans des maisons individuelles du fait de la mise en cohérence plus simple des installations.

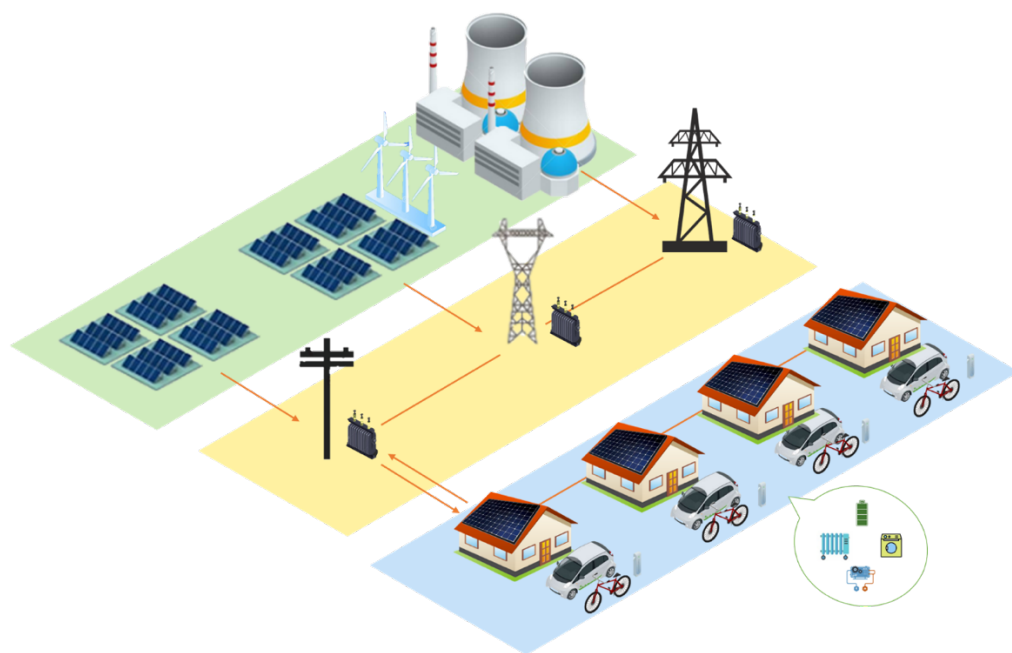


Figure 17. Modalité de couplage des EnR et VE dans maison individuelle

Copropriétés et habitat collectif (mono propriétaire)

Les 3 projets qui composent cette modalité en copropriété et dans des habitats collectifs, utilisent de l'énergie photovoltaïque locale et de l'énergie éolienne non locale dans certains cas. Toutefois, aucune source d'énergie ne prédomine dans les projets.

La particularité de ces projets est qu'ils encouragent l'utilisation de véhicules particuliers issus de flottes de véhicules d'entreprises, principalement pour un usage d'autopartage. Ce modèle d'autopartage utilise des logiciels mobiles pour la réservation de véhicule et pour capturer toute l'information du véhicule afin d'optimiser sa charge ainsi que le partage.

Dans ces projets, les centrales virtuelles ne sont pas utilisées. Deux des trois projets proposent une recharge intelligente, et aucun d'entre eux n'envisage l'utilisation de V2G.

Les projets qui font partie de cette modalité sont :

- 3E MFH
- BienVEn
- eAutarke Zukunft



Figure 18. Modalité de couplage des EnR et VE dans copropriétés et Habitat collectif (mono propriétaire)

- Modalités du couplage sur les lieux de travail

Un nombre important de véhicules passent la journée en stationnement sur les lieux de travail donnant un gisement de couplage très intéressant. Le couplage des énergies renouvelables se fait principalement en local et majoritairement avec une électricité d'origine photovoltaïque. Les modalités d'utilisation sont principalement à usage individuel et en autopartage. Les aires de chargement se trouvent sur les parkings d'entreprise, d'entrepôts et de bâtiments tertiaires.

Sur ces sites l'électricité produite par le photovoltaïque et la recharge du véhicule sont plus facilement synchronisées car l'optimum de production photovoltaïque qui est en milieu de journée correspond à la période durant laquelle le véhicule est

stationné. C'est sans doute la configuration qui propose les meilleures opportunités de couplage.

Parking d'entreprise et bâtiment tertiaire

Il y a 10 projets qui comptent des points de charge dans ces lieux, principalement avec un couplage avec de l'énergie photovoltaïque locale et avec de l'énergie éolienne non locale. Les projets sont :

- Ashton Hayes Smart Village
- EMiLippe
- WE DRIVE SOLAR
- SAP Laps
- Thecamp
- ColognE-mobil
- eAutarke Zukunft : Ce projet comprend des points de charge dans les deux endroits
- Evergreen
- Smart Grid in Balans

Ces projets favorisent l'autopartage via des flottes de véhicules particuliers, de la même manière, ils favorisent la recharge intelligente et le V2G. Un projet particulier « we drive solar », utilise cette technologie pour assurer une plus grande flexibilité du système énergétique de l'entreprise. Cette modalité regroupe aussi les projets utilisant les véhicules utilitaires pour des activités professionnelles.

Dans ce scénario, la possibilité d'autoconsommation est plus grande, de sorte que le surplus de production non consommé lors de la recharge du véhicule est directement consommé par le bâtiment pendant les heures de travail, principalement pendant les heures de production d'énergie photovoltaïque. L'attribution de la production photovoltaïque à la charge des véhicules électriques plutôt qu'aux bâtiments semble relever plus d'une convention liée à l'expérimentation que d'une véritable optimisation dans l'allocation de l'énergie.



Figure 19. Modalité de couplage des EnR et VE dans les parkings d'entreprises et bâtiments tertiaires.

Les entrepôts

Contrairement aux parkings d'entreprises ou aux bâtiments tertiaires, les entrepôts utilisent localement de l'énergie éolienne pour la coupler avec la recharge des

véhicules électriques plutôt utilitaires. Dans ce cas, nous considérons les véhicules disposant des batteries de grande capacité. L'un des projets « BESIC » est situé dans le port de Hambourg. Ce projet étudie en particulier l'échange d'énergie à partir des batteries des véhicules utilitaires du port. Cette modalité n'exclut pas l'utilisation de la flotte de véhicules VP pour un usage individuel.

Les projets dans cette modalité n'envisagent pas l'utilisation d'une centrale virtuelle. Un seul d'entre eux « e-carPark » étudie la possibilité de V2G et de recharge intelligente. Les 2 projets qui entrent dans cette modalité sont :

- BESIC
- e-carPark



Figure 20. Modalité de couplage des EnR et VE dans les entrepôts

L'utilisation de l'énergie éolienne pour assurer le couplage est cohérente car les véhicules fonctionnent principalement pendant les heures de production solaire, de sorte que les opportunités de couplage de la charge des véhicules sont plus réduites. La production éolienne se produisant aussi la nuit, pendant le temps d'inactivité des véhicules utilitaires, elle est un vecteur intéressant de couplage.

- **Modalité de couplage dans les espaces publics**

Les lieux de charge qui sont contenus dans cette modalité comprennent, les parkings publics en rue, les parkings relais, les parkings d'aire d'autoroute ou de stations-services et les stations-services en ville.

Les projets ont plusieurs similitudes. Il n'y a pas de source d'énergie prédominante, l'énergie solaire et éolienne sont également utilisées dans tous les projets. L'utilisation du mix énergétique réseau est également envisagée principalement dans les parkings d'autoroute et dans les stations-services.

Le couplage est principalement non local. La plupart des projets utilisent des dispositifs de recharge intelligente. Dans cette modalité, les centrales virtuelles ne sont pas utilisées et le V2G n'est pas très exploré.

Le type d'utilisation le plus fréquemment rencontré est la mobilité individuelle, et dans une moindre mesure, la location de véhicules. Cette modalité de couplage dans ces espaces ouverts au public fait face en général à une plus grande variété de véhicules, comme les véhicules de grande taille dont les trajectoires et les motifs de mobilité sont aussi très variés. Dans ce contexte le stationnement est lié au temps de charge. Dans certains cas, plutôt urbains, il peut apparaître un conflit entre la durée

de stationnement du véhicule et la durée de charge qui peut limiter les temps de charge par borne.



Figure 21. Modalité de couplage des EnR et VE dans les Parkings Relais, Parking aire d'autoroute ou station de service, Station-service en ville, Parking public (de rue)

Les projets qui rentrent dans cette modalité sont :

- Dutch Smart Charging
- Sunmoov Lyon Smart Community
- SEEV4
- L'ombrière photovoltaïque de baratier
- ColognE-mobile

- **Modalité de couplage dans les parkings publics et privé avec accès limité ou usage particulier**

Cette modalité d'utilisation inclut les emplacements de charge les moins fréquents dans la base de données. Elle inclut les projets de parkings de surfaces commerciales, le dépôt de véhicule de transport en commun, les parkings de gares et les parkings d'aéroports.

L'utilisation individuelle du véhicule prédomine, à l'exception du projet ColognE-mobil qui implique un véhicule de transport en commun rechargé avec l'énergie renouvelable. Les projets dans cette modalité utilisent l'énergie solaire et éolienne produite localement et non localement. Les stationnements sur des gares ou des aéroports offre des opportunités de couplage intéressante du fait d'une durée de stationnement particulièrement étendue dans la journée ou dans la semaine.

Ces projets n'incluent pas systématiquement une recharge intelligente ou la technologie V2G. De la même manière, les centrales virtuelles ne sont pas utilisées. Un seul projet possède un système de stockage stationnaire.

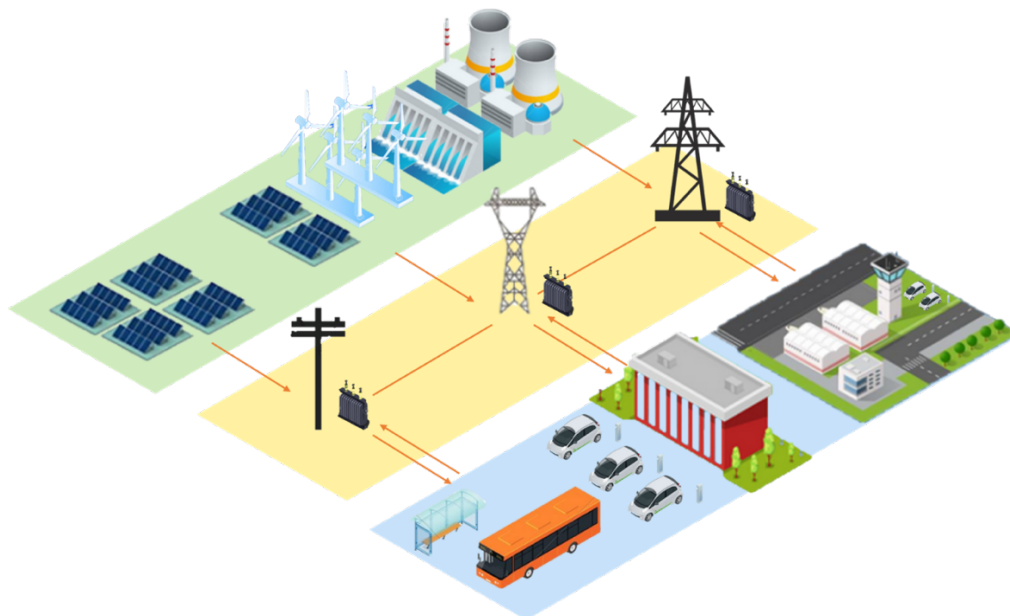


Figure 22. Modalité de couplage des EnR et VE dans les Parkings de gares, les Parkings d'aéroport, parking de surfaces commerciales, et dépôt de transport en commun.

Dans cette modalité, trois sont identifiés dans la base de données du JRC et le troisième est un projet régional

- ColognE-mobil
- Evergreen
- TGV Aix en Provence

Il n'a pas été possible de classer la totalité des projets dans ces quatre modalités car certains projets portaient sur plusieurs modalités, d'autres ne fournissent pas suffisamment d'information et ne permettent pas d'établir tous les critères de couplage. Toutefois, il est assez clair qu'une distinction des opportunités de couplage selon les lieux est pertinente car elle génère des configurations assez différentes répondant à des besoins et à des potentiels plus ou moins facilement mobilisables selon les durées et le positionnement des stationnements des véhicules électriques. Il est d'ores et déjà possible d'identifier le couplage en entreprise avec des véhicules particuliers ou sur des aires de stationnement de gares ou d'aéroports comme des modalités ayant de bonnes opportunités pour la synchronisation des charges avec la production d'électricité issue d'EnR, car les stationnements sont plutôt longs et récurrents permettant un pilotage optimal des charges. Ces potentialités doivent être affinées selon l'utilisation des véhicules (particulier, partagé, utilitaire...) et selon la maîtrise des aménagements dans les lieux considérés (maison individuelle, copropriété, entreprise...).

Cette section montre que les projets sont assez différents les uns. La diversité des lieux de charge et des motifs de mobilité rendent difficile l'identification d'enseignements communs qui pourraient être utilisés pour guider le déploiement de projets similaires en région. Il semble nécessaire d'opérer une sélection dans ces projets afin d'extraire des projets emblématiques sur lesquels une analyse plus poussée pourra être menée.

2.3. Sélection des projets emblématiques

Pour aller plus loin dans l'identification des opportunités de couplage il est nécessaire d'aller dans un niveau de détail plus important afin d'identifier les facteurs favorables

et limites. Ce travail ne peut pas être fait sur l'ensemble de la base du fait de l'hétérogénéité des informations présentes et des projets emblématiques ont été sélectionnés pour mener ce travail plus détaillé. Les projets emblématiques sont choisis en fonction de la disponibilité des informations, mais aussi au regard de la possibilité d'utiliser ces informations pour répondre à des questions essentielles sur l'intérêt du couplage, la possibilité de reproductibilité du projet dans la région et finalement sur l'existence de résultats probants. À cette fin, une liste de questions sur les opportunités de couplage a été élaborée sur la base des analyses menées jusqu'à présent et les projets permettant de contribuer à répondre à ces questions ont été identifiés (cf. Annexe 1).

Les questions sont regroupées dans différentes thématiques. La première thématique correspond aux modalités de charge utilisées afin de répondre aux contraintes de couplage, aux profils de charge et examine les opportunités de couplage selon le lieu de charge. La deuxième thématique correspond aux aspects de mobilité et des types d'usages du véhicule. La troisième thématique correspond à l'exploitation des énergies renouvelables, le type de couplage local ou non local. La quatrième thématique correspond au système d'optimisation des charges notamment l'utilisation du Smart Charging et les modalités de flexibilité utilisées. Une dernière thématique est dédiée au le stockage de l'énergie et à la technologie V2G.

Modalités de charge

Nous avons vu que le lieu de charge détermine les opportunités de synchronisation des énergies renouvelables et la recharge du véhicule, par conséquent, les modalités de couplage diffèrent selon le lieu de charge et les conditions géographiques du lieu. L'emplacement des bornes de charge détermine les conditions pour un couplage local ou non local. Le fait que la recharge soit dans un lieu public ou privé modifie la logique de charge et les profils de charge des utilisateurs.

L'idée est de comprendre comment les projets répondent aux enjeux du couplage en sélectionnant les dispositifs pertinents en fonction des contraintes réelles d'expérimentation.

Les énergies renouvelables et le véhicule électrique entretiennent une relation de réciprocité qui leur permet de réduire leurs inconvénients et d'accroître les performances de chacun. Le véhicule électrique est une source flexible de stockage et de consommation d'énergie et les énergies renouvelables permettent au véhicule électrique de réduire son impact environnemental et de maintenir un impact social inférieur à celui du véhicule thermique.

Toutefois les profils de charge changent selon les lieux de charge, les besoins et les contraintes de mobilité des utilisateurs. Dans les espaces résidentiels, les véhicules peuvent être chargés pendant la nuit et offrent donc une flexibilité de charge plus large, les profils de charge dans les lieux de travail correspondent principalement à une charge pendant la journée. Mais il y a d'autres endroits où les profils de charge peuvent être très variés en fonction des besoins comme la charge dans les espaces publics ou les centres commerciaux.

De cette manière, les questions proposées sont orientées vers le comportement des utilisateurs en fonction du lieu de chargement et vers une identification d'aspects reproductibles des projets.

Questions sélectionnées :

- Est-il pertinent de coupler les énergies renouvelables et la recharge du véhicule électrique ?
- Quelles sont les habitudes/profils types de charge des VE ?
- Le fait que les charges se fassent dans un lieu privé ou public modifie t'il les opportunités de couplage ?

Mobilité et type d'usage

Le territoire est décisif pour établir les besoins de mobilité des personnes. Différentes zones ne pouvant pas être couvertes par les transports en commun, il est donc nécessaire de rechercher d'autres modes de transport. La micro-mobilité correspond aux premiers ou derniers kilomètres parcourus, qui peuvent être couverts avec une mobilité douce y compris le véhicule électrique.

Le couplage des énergies renouvelables et la recharge des véhicules électriques propose de nouveaux modes d'utilisation, principalement de mobilité partagée, car plus l'utilisation du véhicule augmente, plus le nombre de kilomètres parcourus est grand et plus l'impact produit lors de la phase de fabrication du véhicule est amorti, compensant donc l'impact environnemental de la production. Ces nouveaux modes doivent être questionnés afin de mieux comprendre les opportunités fournies par l'utilisations des VE.

Questions sélectionnées :

- La micro et macro-mobilité sont-elles déterminantes pour le couplage des EnR et VE ?
- Pour améliorer le coulage des charges et de la production EnR, faut-il promouvoir un type d'électromobilité individuelle ou collective et sous quel type d'usage partagé ou individuel ?

Exploitation des énergies renouvelables

Le type d'énergie renouvelable modifie les conditions de couplage. Il est plus facile d'installer de l'énergie photovoltaïque localement et de la consommer sur le même lieu de production. L'énergie éolienne nécessite de conditions géographiques et juridiques plus contraignantes pour son déploiement et sa performance.

La source de production détermine aussi la distance du transport d'énergie. Dans une situation d'autoproduction et d'autoconsommation, les pertes d'énergie sont réduites et donc les performances du système augmentent. Tous les lieux de chargement ne permettent pas la production locale et certaines sources d'énergie conviennent mieux à certains points de charge.

L'un des arguments qui justifient le couplage est l'amélioration de l'impact environnemental des véhicules électriques alimentés par une source d'énergie non polluante. Le nombre de véhicules pouvant être alimentés dépend de la puissance installée, et du type d'énergie utilisé. Les résultats du couplage peuvent varier en fonction de chacun de ces éléments.

Questions sélectionnées :

- Les productions d'EnR peuvent-elles couvrir les besoins de charges des VE et sous quelles conditions ?
- Est-il préférable d'avoir un couplage local ou non local ?
- Synchroniser les charges avec la disponibilité d'EnR favorise t'il systématiquement l'impact sur l'environnement ?

Système d'optimisation de charge

L'optimisation de la charge dépend d'un système pilotable qui permet de synchroniser correctement la production d'énergie avec la demande des véhicules. La flexibilité de la charge joue un rôle important. La flexibilité de chargement varie aussi en fonction des besoins des usagers et du lieu de chargement.

Plus le véhicule reste longtemps immobile, plus le potentiel de flexibilité de charge est grand, car plus le temps pour se charger sera important. Si le temps de stationnement est réduit sa flexibilité de charge est moindre.

Questions sélectionnées :

- La flexibilité de la charge est-elle nécessaire pour optimiser le couplage des énergies renouvelables et la recharge des véhicules électriques ?

- Quel est le modèle ou le mécanisme de flexibilisation le plus adapté pour promouvoir le couplage ?
- Pour garantir le couplage ENR et VE, une centrale virtuelle est-elle nécessaire ?

Système de stockage d'énergie

L'une des limites des énergies renouvelables réside dans le fait que la production de ces dernières est déconnectée de la demande en énergie et difficiles à stocker. La production d'énergie renouvelable exige un renforcement des réseaux locaux pour soutenir la capacité de production. La batterie du véhicule peut être utilisée comme un élément stabilisateur de l'offre et de la demande, comme un simple consommateur d'énergie ou comme une source de stockage. Des concepts tels que le V2G sont introduits, qui permettent de doter le véhicule d'une fonction bidirectionnelle fournissant des services additionnels de flexibilité et d'optimisation aux réseaux de distribution et aux utilisateurs.

Questions sélectionnées :

- Est-il nécessaire d'avoir un système de stockage d'énergie pour augmenter la partie de renouvelables utilisée pour la recharge de VE ?
- Les charges changent-elles avec la taille des batteries ? Cela a-t-il une influence sur les opportunités de couplage ?
- Est-ce que l'implémentation du V2G change les opportunités de d'utilisation d'une batterie de stockage stationnaire, favorise l'équilibre entre la production d'énergie et la recharge du véhicule ?

Tous les projets ne répondent pas systématiquement à toutes les questions sélectionnées mais doivent pouvoir apporter des éléments de réponse au plus grand nombre. Selon cette logique 7 projets emblématiques ont été identifiés car ils ont le plus de potentiel pour contribuer à une analyse comparée détaillée :

- 3EMFH
- SEEV4
- BeMobility
- Emilippe
- Demand Response
- Well2Wheel
- e-carPark

2.4. Enseignements des projets emblématiques

Bien que les projets ne soient pas reproductibles dans leur totalité en région, ils apportent des éléments permettant de définir un modèle de couplage qui soit acceptable au niveau technique, économique et social. Leur analyse détaillée en référence aux questions sélectionnées, permet de dégager des enseignements qui sont en mesure de contribuer à un meilleur déploiement des projets de couplage en région.

• Modalités de charge

Le lieu de charge est un facteur déterminant pour établir les conditions de couplage des énergies renouvelables et de la recharge du véhicule électrique, la dynamique varie en fonction des scénarios et des conditions géographiques de chaque lieu. Les

conditions techniques ne sont pas les mêmes si le véhicule se charge dans un lieu résidentiel ou s'il se charge sur un lieu de travail.

Les profils de recharge des véhicules dépendent en grande partie du lieu de couplage. Le couplage est différent s'il se réalise sur un espace public tel qu'un parking public ou s'il est effectué sur le lieu de travail ou dans des résidences. Les opportunités de couplage dépendent du temps que le véhicule passe en stationnement sur le lieu. Si nous considérons un couplage dans une résidence privée, le véhicule reste la plupart du temps en stationnement la nuit, ce qui est différent d'un véhicule particulier sur un parking d'entreprise qui sera plutôt chargé pendant la journée.

Chaque projet aborde différemment les questions liées au lieu de chargement selon l'environnement et ses objectifs. Il est possible de retenir que l'analyse sectorisée des profils de charge aide à établir un état initial pour identifier des opportunités de flexibilité et de couplage des charges.

1. Est-il pertinent de coupler les énergies renouvelables et la recharge du véhicule électrique ?

Pour répondre à cette question, plusieurs projets insistent sur l'importance du véhicule électrique en tant qu'élément clé de la réduction des émissions de CO₂. Grâce à l'utilisation des énergies renouvelables. Le véhicule électrique y est présenté comme une alternative viable pour réduire l'impact du transport sur l'environnement. Le projet **3EMFH** mentionne que « *Avec la transition énergétique, le nombre de véhicules électriques augmente. Les véhicules électriques ne seront exempts de CO₂ que s'ils sont chargés d'énergie renouvelable.* »

Cette affirmation permet, d'une part, de montrer que l'intérêt du développement du véhicule électrique réside dans la source d'énergie avec laquelle il est alimenté. Le mix énergétique de chaque pays influe considérablement sur l'impact des véhicules électriques. Le déploiement des VE n'aura donc de sens que si les sources de recharge sont décarbonisées. Dans le cas français, compte tenu du fait que le mix énergétique est en grande partie composé d'énergie nucléaire, son contenu en CO₂ est réduit. Toutefois, une préférence des usagers pour un mix électrique issu de sources uniquement renouvelables doit être prise en compte.

Dans le cas du projet 3EMFH l'utilisation de l'électricité produite localement par la voiture électrique, est économiquement plus favorable que celle issue d'une connexion au réseau. Il y a potentiellement un effet d'entraînement réciproque entre le développement des EnR et le développement des véhicules électriques. Cependant le couplage à lui seul ne suffit pas pour impulser le développement du marché des énergies renouvelables et des voitures électriques. Le développement des voitures électriques nécessite une stimulation plus forte du fait que les coûts d'acquisition restent très élevés. La gamme de voitures électriques est aussi beaucoup plus réduite. De plus l'infrastructure de charge n'est souvent pas suffisamment développée pour rassurer les clients potentiels. Pour favoriser le couplage, il est nécessaire de développer plus d'instruments incitatifs ou d'attendre des changements plus profonds dans les conditions actuelles.

[REX1.1] : Il est pertinent de favoriser le couplage de la charge des VE avec la production d'EnR car le couplage favorise une diminution des émissions de CO₂ durant la phase d'usage des VE et cette diminution est d'autant plus forte que le mix énergétique est à base d'EnR.

[REX1.2] : Il y a une synergie dans le couplage qui permet de trouver une demande à la production d'EnR et de rendre attractif l'usage du VE.

[REX1.3] : L'intérêt du couplage est fortement dépendant de la couverture géographique de l'infrastructure de charge, du déploiement du Smart Charging ainsi que du V2G.

2. Quelles sont les habitudes/profils types de charge des VE ?

Pour répondre à cette question le projet **SEEV4 Towards emission free traffic in Amsterdam**, effectue une analyse des profils de charge des véhicules électriques en fonction de leur répartition géographique et de la production d'énergie renouvelable, en particulier d'énergie solaire et éolienne.

Le projet cherche à répondre à la question suivante : Quel est le potentiel d'une charge statique intelligente pour augmenter l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne dans la recharge des véhicules électriques et pour diminuer les émissions de CO2 à Amsterdam pour la période 2016-2035 ?

Pour répondre à la question, le projet a analysé la production d'énergie solaire et éolienne au cours de la période 2016-2035. En outre, une prévision de la demande de recharge de véhicules électriques pour cette période a été établie.

L'impact de l'intégration de la charge et de l'utilisation des énergies renouvelables a également été analysé et les obstacles de l'intégration de la recharge des véhicules avec des énergies renouvelables ont été étudiés.

Afin d'accroître la part des énergies renouvelables dans la recharge du véhicule, le projet a réalisé une analyse des profils de charge simultanément à une prévision des énergies renouvelables produites dans la ville. À cet effet, des points de charge ont été choisis dans différents quartiers générant une couverture de tous les secteurs de la ville.

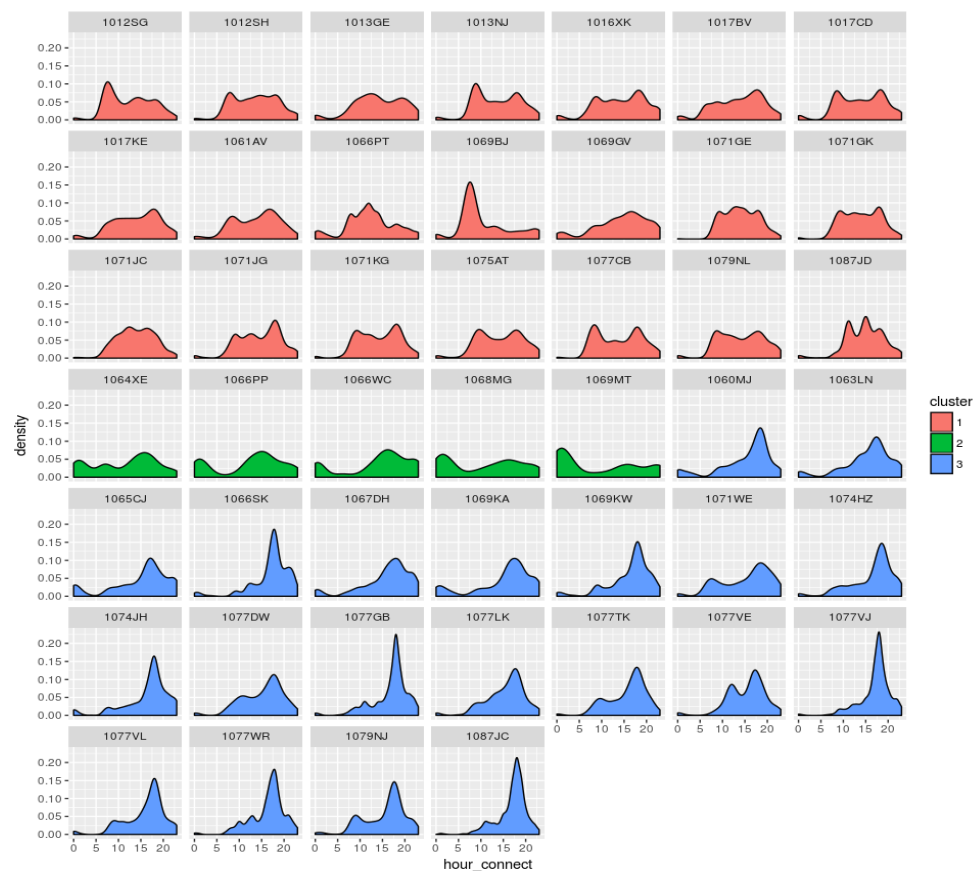


Figure 23. Profil de charge des véhicules par point de charge de SEEV4-City en 2016
Les profils de charge sont concentrés en trois clusters, (figure 23) le premier groupe représente les points de charge qui sont utilisées pendant la journée. Ces points de recharge sont principalement utilisés par les visiteurs et se trouvent principalement

dans le centre et le sud d'Amsterdam. Le second groupe est constitué des points de charge présentant des charges qui commencent tard le soir et la nuit. Tous ces points de recharge sont situés à l'ouest de la ville. Enfin, le troisième est assez proche du second mais la plupart des sessions de charge commence entre 17h00 et 20h00, les points de charge sont qualifiés de zones résidentielles. Ces profils territorialisés permettent de constater que le comportement de la charge varie considérablement en fonction de la position des points de charge dans les trajectoires de mobilité. Les points de chargement centraux et principalement commerciaux ont un profil de charge réparti tout au long de la journée entre 7h00 et 20h00. Les quartiers résidentiels ont un profil de charge qui commence entre 17h00 et 20h00 mais qui dure toute la nuit. Les points de charge se situant dans les quartiers résidentiels ont aussi une demande d'énergie pendant la journée. Ce phénomène peut être dû au type de population qui habite ces lieux, comme des retraités ou des personnes au foyer. La composition sociale du quartier peut ainsi modifier les courbes de charge. Pour établir les profils de charge, il est donc nécessaire de prendre en compte les lieux où le véhicule passe la plupart du temps et les habitudes de mobilité usagers. Ce projet montre que les profils de charge peuvent varier même dans la même ville et qu'ils sont dépendant du lieu de chargement, que ce soit dans un lieu public ou privé. Les opportunités de couplage diffèrent selon le lieu de charge. Les profils diurnes favorisent un coulage avec de l'électricité d'origine photovoltaïque. Si les profils de charge indiquent une consommation supérieure la nuit, il est nécessaire de prendre en compte d'autres sources d'énergie comme l'énergie éolienne ou de considérer un stockage stationnaire.

[REX 2.1] : Les profils de charge varient en fonction du lieu de charge et des conditions socio-économiques.

[REX 2.2] : Les profils de charge sont différents selon le territoire et les besoins de mobilité des utilisateurs.

[REX 2.3] : L'analyse des profils de charge sectorisés et stratifiés en fonction des considérations de voisinage permet de comprendre le comportement de charge des utilisateurs et d'identifier les mailles du réseau favorables au couplage.

[REX 2.4] : La construction de profils de charge permet d'identifier le potentiel de la synchronisation de la production avec les besoins en charge et d'améliorer les performances de couplage.

3. Le fait que les charges se fassent dans un lieu privé ou public modifie t'il les opportunités de couplage ?

Le projet **SEEV4** nous permet de répondre à cette question. Le point de chargement dans un lieu privé et public modifie clairement les possibilités de couplage. D'une part parce que la puissance requise pour la recharge varie en fonction du nombre de véhicules utilisant le point de charge. Dans un lieu de chargement privé tel qu'une résidence, la demande en énergie est plutôt inférieure à celle d'une borne de chargement dans un parking public. Du fait du taux d'utilisation de bornes, les capacités de couplage sont donc différentes. Un point de charge privé dépend entièrement de la flexibilité de charge d'un individu, alors que dans un lieu public, l'utilisation de la borne est plus variée du fait de la multiplicité des utilisateurs. Cette multiplicité des usages peut aussi entraîner des conflits d'usages car le stationnement des véhicules peut limiter les possibilités de charge et nécessiter des tarifications incitatives.

[REX 3.1] : Le comportement des utilisateurs varie en fonction des points de charge publics ou privés, et des lieux des espaces résidentiels ou de travail.

[REX 3.2] : La flexibilité de charge est différente dans un espace public ou privé car le stationnement a une durée et correspond à un besoin différent. Les stationnements dans les espaces publics ouverts sont généralement plus courts que dans les espaces privés ou les espaces fermés.

- **Mobilité et type d'usage**

L'amélioration technologique des véhicules électriques permet de parcourir de plus grandes distances sans avoir à recharger le véhicule. L'autonomie du véhicule électrique est l'une des préoccupations inhérentes au véhicule électrique. Aujourd'hui, la Renault Zoe dispose d'une autonomie de 300 km, même si les besoins réels en trajets quotidiens sont en moyenne entre 1 et 50 km. Cela signifie que le véhicule peut facilement couvrir ce type de déplacement sur de courtes et longues distances en considérant une bonne infrastructure de recharge.

Cependant, nous pouvons voir que les besoins quotidiens peuvent être satisfaits par d'autres moyens de transport, tels que les véhicules à deux roues. Une mobilité douce peut également être utilisée pour atténuer les impacts des émissions de CO₂ produites par les véhicules thermiques.

De même, la mobilité électrique propose de nouveaux modes de transport tels que le covoiturage et l'autopartage. Ces modèles ont un intérêt car ils permettent de réduire l'impact environnemental des véhicules électriques lors de leur utilisation.

4. La micro et macro-mobilité sont-elles déterminantes pour le couplage des EnR et VE ?

La micro-mobilité est un terme utilisé pour décrire le moyen de transport utilisé pour parcourir de courtes distances, généralement le premier ou le dernier kilomètre d'un itinéraire²⁶.

Cet itinéraire peut correspondre à l'itinéraire emprunté pour rejoindre une station de transport en commun ou pour parcourir de courtes distances jusqu'au lieu de travail. Ce type de mobilité s'accompagne d'une mobilité durable, principalement l'utilisation du vélo, à pieds, ou de moyens de transport non polluants tels que les différents types de véhicules électriques.

Le couplage des énergies renouvelables peut répondre aux exigences de la micro-mobilité principalement avec l'utilisation du vélo et des scooters électriques. Toutefois des modèles commerciaux plus robustes sont nécessaires pour obtenir les avantages attendus.

Une grande partie des trajets quotidiens tels que le domicile-travail ou le domicile-étude correspondent à des distances courtes. Dans la région SUD, les salariés

²⁶ RTBF, 2019, Déplacements : l'avenir est dans la micro-mobilité, https://www.rtbf.be/lapremiere/article/detail_deplacements-l-avenir-est-dans-la-micro-mobilite?id=9816018

préfèrent utiliser la voiture pour parcourir des distances entre 1 et 5 kilomètres²⁷. Par conséquent, cette courte distance peut être couverte au moyen de moyens de transport durables.

Un projet qui aborde ces logiques est le projet **BeMobility 2.0, Electromobility Model Region Berlin/Potsdam**. Ce projet a comme objectif l'intégration effective du véhicule électrique de location dans les systèmes transport en commun à Berlin. Le projet comprend deux phases, BeMobility 1.0 et BeMobility 2.0. Il cherche également à intégrer les sources d'énergie locales telles que l'énergie éolienne et solaire à travers un micro-réseau intelligent pour la recharge d'une flotte de véhicules.

La flotte de véhicules comprend 75 véhicules électriques / hybrides (Vélos, scooters, voitures) avec 20 points de recharge connectés à une plate-forme d'électromobilité. Un micro smart grid, est alimenté par des énergies éoliennes et solaires. Le projet compte 15 aires de covoiturage pour recharger les véhicules.

La flotte de véhicule a été intégrée aux transports en commun via un ticket combiné. Dans les quartiers sélectionnés, une offre de voitures partagées pour les résidents a été installée, qui comprend également des vélos électriques et des scooters électriques, ainsi que des voitures électriques.

Grâce à ce projet, il a été possible de montrer que les offres multimodales de véhicules de location génèrent une augmentation de la demande de transports en commun et de l'utilisation de la voiture en autopartage. Il a été également nécessaire de renforcer et d'améliorer les stations de chargement pour accroître la rentabilité du service et d'en accroître l'utilisation afin d'amortir rapidement la valeur d'investissement.

L'une des conclusions du projet indique que, lors des tests effectués, il a été possible d'identifier que les batteries de véhicules électriques pouvaient être mobilisées en tant que source de stockage d'énergie. Selon une estimation elles pourraient générer des revenus pouvant atteindre 1 000 euros par voiture électrique par an.

Malheureusement les informations disponibles sur les détails du projet sont faibles. Toutefois, en termes généraux, les résultats ont montré que l'inclusion de véhicules de partagés avec les moyens de transport conventionnels peut avoir un impact positif et encourager l'utilisation des transports en commun par les utilisateurs. Cela inclut l'utilisation de bicyclettes, de scooters et d'automobiles.

Le couplage peut aussi s'intégrer à des systèmes proposant une micro-mobilité et une macro-mobilité sur de longues distances, réduisant l'utilisation du véhicule personnel sur de courtes distances et améliorant l'offre de transport multimodal. La production d'énergies renouvelables est bien adaptée pour couvrir le trajet de petites distances si l'on ne considère que la puissance de charge nécessaire et le gain d'autonomie nécessaire pour effectuer le déplacement souhaité. Les stations de charge peuvent ainsi ne pas charger à 100% le véhicule pendant la journée, mais donner une autonomie suffisante au véhicule en km jusqu'à la destination finale. En raison des courtes distances, le Range Anxiety des utilisateurs du service est réduite.

[REX 4.1] : Le véhicule électrique en location ou en autopartage peut être intégré au système de transport en commun dans les endroits où le transport en commun n'est pas accessible.

[REX 4.2] : Le véhicule électrique répond de manière appropriée aux trajets courts et couvre les micro-déplacements en réduisant de manière optimale l'impact des véhicules thermiques sur l'environnement.

[REX 4.3] : L'intégration du véhicule électrique dans la micro-mobilité et la mobilité peut être favorable dans les villes où le système de transport en commun est robuste et répond largement aux besoins des utilisateurs.

²⁷ INSEE, 2017 Aller travailler en vélo est peu fréquent en Provence-Alpes-Côte d'Azur, https://insee.fr/fr/statistiques/2553852#graphique-Figure_2

[REX 4.4] : L'intégration du véhicule électrique doit être accompagnée de politiques publiques qui stimulent à un niveau tarifaire l'utilisation du véhicule dans la chaîne de transport public.

[REX 4.5] : Le couplage s'adapte bien à des logiques de micro-mobilité du fait des besoins plus limités en charge.

5. Pour améliorer le coulage des charges et de la production EnR, faut-il promouvoir un type d'électromobilité individuelle ou collective et sous quel type d'usage partagé ou individuelle ?

La mobilité partagée et les véhicules en autopartage sont des modalités de mobilité qui se développent. L'autopartage a un intérêt particulier dans le cas du véhicule électrique car son coût social de la fabrication et de démantèlement sont plus élevés que ceux d'un véhicule thermique. Une voie principale de la réduction de l'empreinte environnementale du véhicule électrique sur son cycle de vie est donc de maximiser sa période d'utilisation afin d'augmenter le nombre de kilomètres parcourus, car selon le mix énergétique utilisé le véhicule électrique peut alors présenter un bilan global plus avantageux que celui d'un véhicule thermique.

Les véhicules en autopartage, lorsqu'ils parcourent plus de kilomètres, améliorent leur bilan environnemental tout en permettant de partager les coûts avec tous les utilisateurs du service.

Les projets montrent que les entreprises manifestent un grand intérêt pour le déploiement d'un modèle de partage automatique, car cela permet à leurs employés d'avoir accès aux véhicules électriques, d'absorber la production d'énergie renouvelable localement ou non et d'optimiser le coût de la flotte de véhicules.

Un exemple de ce modèle de partage est donné par le projet **EMiLippe**. Le projet EMiLippe vise à développer un système de mobilité électrique pour des entreprises dans une région rurale qui utilise la plus grande quantité d'énergie renouvelable générée localement. Les acteurs du projet sont des entreprises et des instituts situés dans la région, qui disposent d'une flotte de véhicules électriques. Le parc de véhicules est utilisé mutuellement par les employés. Le projet a été conçu pour garantir une disponibilité géographique et temporelle élevée en tenant compte des contraintes de mobilité et de disponibilité géographique des véhicules.

Le système permet à un utilisateur d'effectuer une réservation du véhicule via une application web où il entre un point de départ, une destination finale et des écarts éventuels. Grâce aux informations fournies, un programme de mobilité est créé pour cet utilisateur puis intégré dans le système d'information de l'entreprise.

Le système de gestion de la mobilité permet de capturer toutes les informations du véhicule relatives aux déplacements, au temps et aux besoins de recharge. Si nécessaire, le programme envoie un signal de besoin de charge qu'il partage avec toutes les entreprises participant au projet afin d'estimer le temps de chargement du véhicule. L'un des enjeux du système de partage et de mobilité est d'intégrer les aléas des déplacements pour assurer la meilleure disponibilité de la flotte.

Selon le besoin de chargement, l'entreprise au point d'arrivée estime une charge sur la base de la quantité de kWh, la vitesse de charge CA / CC, le niveau de stockage, l'énergie EnR disponible actuelle, la période d'attente prévue du véhicule dans le lieu, la période d'attente prévue pour la production d'EnR et le prix de l'énergie à ce moment. Le lendemain, l'utilisateur peut valider le voyage et ajouter les informations qu'il juge nécessaires.

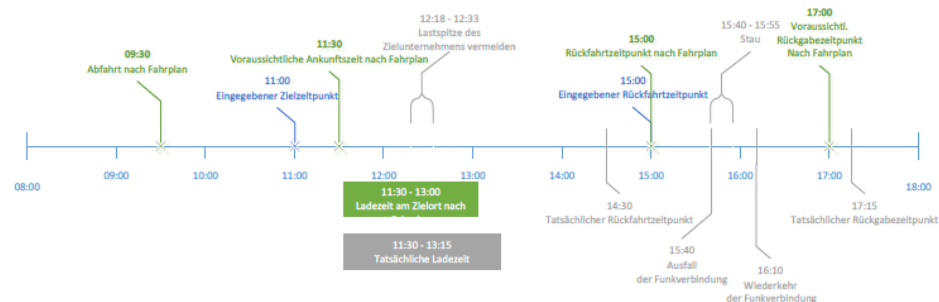


Figure 24. Programmation de réservation de véhicule.

Dans la figure 24, la boîte grise correspond au temps de charge réel. La boîte verte indique le temps de charge estimé. Les lignes vertes correspondent à l'heure de départ et à l'heure d'arrivée des points de départ et de destination. Les lignes grises correspondent aux retards possibles de l'utilisateur. Dans ce cas, le véhicule est parti à 9 h 30, avait une durée de trajet estimée à deux heures mais était arrivé 30 minutes plus tôt (ligne bleue à 11 heures). Une durée de charge de 1h30 minutes a été estimée, mais le temps réel a été de 1h45 minutes. Le véhicule est revenu 30 minutes en avance de ce qui était prévu à 14h30, l'heure d'arrivée estimée était à 17h00, mais en raison d'un retard, le véhicule est arrivé à 17h15. Cet exemple montre les aléas devant être pris en compte dans la gestion partagée d'un même véhicule sur différents trajets.

La recharge des véhicules est effectuée dans chaque entreprise participant au projet avec une production locale générée dans des ombrières solaires installées sur le parking des entreprises. Ce système contient également un système de stockage d'énergie stationnaire permettant de capter la plus grande quantité d'EnR et de l'utiliser pour recharger le véhicule. Le système de gestion de la mobilité leur permet d'estimer la production et les besoins du véhicule en temps réel.

Les entreprises participant à ce projet partagent des caractéristiques communes qui ont permis la mise en place d'un système d'itinérance commun en autopartage avec une charge couplée avec de la production d'EnR en local. Ce projet est un exemple de coopération entre entreprises sur un territoire. Il démontre que les besoins de mobilité des entreprises peuvent être couverts par le véhicule électrique o-pour des itinéraires moyens d'environ 40 à 50 km. L'optimisation de l'utilisation des véhicules électrique par le système de gestion de mobilité permet aussi d'améliorer le retour sur investissement.

[REX 5.1] : La mobilité partagée crée un modèle économique favorable pour le véhicule électrique, lui permettant de réduire son impact environnemental.

[REX 5.2] : La mobilité partagée permet d'amortir rapidement la valeur du véhicule électrique en raison de l'utilisation accrue du véhicule par différents utilisateurs et le partage des coûts entre les différents acteurs.

[REX 5.3] : L'outil de gestion de la mobilité individuelle est un élément important de l'optimisation de l'utilisation des véhicules électriques et de la mobilisation des EnR pour les charges durant les périodes de stationnement.

[REX 5.4] : Les flottes de véhicules d'entreprises se prêtent plus facilement à un pilotage, à une optimisation des déplacements et des charges par l'intégration d'un système de mobilité au système d'information des entreprises. Dans le cas d'une mobilité individuelle à grande échelle, la synchronisation et l'optimisation en fonction du lieu de charge devient plus complexe.

[REX 5.5] : Sans système de stockage stationnaire, il existe un arbitrage entre l'optimisation de la disponibilité de la flotte et le couplage local, notamment avec l'électricité d'origine photovoltaïque.

- **Exploitation des énergies renouvelables**

L'énergie renouvelable utilisée pour recharger le véhicule diffère selon le lieu de rechargement. L'énergie photovoltaïque montre une meilleure adaptation au couplage local car elle est facile à installer et peut avoir une plus grande couverture en fonction de la situation géographique du lieu. Les toits des résidences ou des entreprises semblent constituer un scénario favorable pour l'installation de panneaux pour une autoconsommation de l'énergie dans les mêmes bâtiments.

En revanche, l'éolien est plus difficile à intégrer notamment en milieu urbain car il est nécessaire de respecter des périmètres d'éloignement et il faut des espaces ouverts pour permettre au vent circuler sans obstacle. Ainsi il est souvent nécessaire de disposer d'un aérogénérateur d'une hauteur raisonnable permettant des rendements plus élevés, de sorte que l'éolien semble plus propice pour un couplage non local.

Ces deux types d'énergies sont intermittentes et ne peuvent donc pas être facilement pilotées, sauf avec un système de stockage stationnaire qui permet d'absorber l'excédent d'énergie. De façon générale la consommation d'énergie la plus élevée se produit plutôt dans la soirée alors que la production solaire est générée le jour. L'énergie éolienne moins prévisible, se produit à toute heure de la journée.

Les projets qui abordent le couplage avec les EnR favorisent un couplage local ou non local en fonction des conditions du projet, d'autres tentent de surmonter les barrières de l'intermittence avec des systèmes de stockage d'énergie stationnaire ou avec l'utilisation de véhicules électriques en V1G ou V2G.

6. Les productions d'EnR peuvent-elles couvrir les besoins de charges des VE et sous quelles conditions ?

Cette question n'est pas directement abordée, cependant à travers les différents projets il est possible de montrer qu'aucun projet ne fonctionne sans une connexion au réseau de distribution.

Bien que le véhicule électrique puisse absorber plus d'énergie renouvelable en déployant des systèmes de charge flexible, les projets ne permettent pas de démontrer que le véhicule peut être chargé à 100% en énergie renouvelable. Cela dépend en grande partie de la capacité installée, des besoins de charge et du système de flexibilité des charges des véhicules. Dans le cas de projets en maisons individuelles, l'autoconsommation de l'habitation est également prise en compte, de sorte que l'énergie n'est pas uniquement destinée à recharger le véhicule électrique. Dans le cas des entreprises, le nombre de véhicules impliqués dans les projets est important de sorte que la puissance demandée est généralement supérieure à celle des EnR installées. Il existe aussi une concurrence dans l'affectation de la production d'EnR à la recharge ou à la consommation des bâtiments. De plus, il n'est pas forcément optimal de charger totalement les véhicules électriques. La problématique envisagée consiste à élaborer des modèles de charge intelligents permettant d'optimiser la charge et d'absorber la plus grande quantité d'énergie renouvelable produite localement et non localement.

Dans le projet **Emilippe**, le système de gestion de la mobilité est conçu pour estimer la charge nécessaire du véhicule pendant le temps où il est garé dans l'entreprise. Cette charge ne correspond pas nécessairement à 100% de la recharge du véhicule, mais au pourcentage de charge nécessaire au retour du véhicule jusqu'au lieu

d'origine. La charge du véhicule dépend également du temps de stationnement du véhicule sur le parking. Les programmeurs grâce aux réservations, déterminent ainsi un niveau de charge optimal pour la voiture en fonction de l'itinéraire déterminé avant de quitter le point de départ.

Une connexion au réseau local d'énergie permet de compenser l'énergie nécessaire lorsque les énergies renouvelables produites localement ne suffisent pas. Cela signifie que dans plusieurs cas et en fonction des réserves, l'énergie solaire produite ne suffit pas pour alimenter les véhicules en énergie 100% renouvelable. Le système de recharge intelligent garantit que le véhicule absorbe l'énergie renouvelable disponible sans toutefois permettre une recharge à 100%.

[REX 6.1] : Pour couvrir 100% des besoins du véhicule en énergie renouvelable, une capacité de production importante est requise en fonction du nombre de véhicules à recharger, de l'intermittence et des trajectoires de mobilité.

[REX 6.2] : Du fait des contraintes de production d'énergie renouvelable et de mobilité le couplage réalisé ne couvre pas à 100% la recharge du véhicule et une partie de la production d'EnR est consommée localement par les bâtiments.

[REX 6.3] : Le manque de capacité EnR en local nécessite une connexion aux réseaux de distribution habituels pour satisfaire les besoins des sites. Le couplage nécessite des flexibilités et des investissements qui sont difficilement réalisables en local selon les configurations d'usages.

7. Est-il préférable d'avoir un couplage local ou non local ?

La décision de disposer d'une production locale ou non locale dépend en grande partie des conditions géographiques du lieu de chargement qui permettent de mobiliser les surfaces nécessaires et d'obtenir les rendements souhaités. Bien que dans la plupart des projets, la production locale à travers des panneaux solaires soit prédominante, chaque projet aborde cette question différemment.

Le projet **3EMFH 3E-Mehrfamilienhaus Eigenerzeugung, Eigenverbrauch, Elektromobilität in einem Mehrfamilienhaus** est un projet allemand financé par le ministère fédéral de l'Environnement. Ce projet a été exécuté de 2014 à 2017 dans la ville de Hambourg. Le projet est axé sur trois aspects clés (3E) : l'auto-génération, l'autoconsommation et la mobilité électrique. 3E MFH a été réalisée dans deux unités résidentielles. La première unité, appelée MTS, comprend 9 unités d'habitation, dont 3 seulement ont participé à l'étude. Les coûts d'installation, de stockage et d'éléments d'installation ne concernent que les trois résidences participantes. La deuxième unité, appelée VHD, est composée de 10 unités de logement partageant une connexion électrique générale facturée globalement.

L'objectif principal du projet est l'optimisation économique d'un système énergétique constitué de panneaux solaires, d'une batterie de stockage stationnaire et d'une centrale de production combinée de chaleur et d'énergie. La production photovoltaïque est de 8 088 kWh/a pour le MTS et de 9 788 kWh/a pour le VHD, le système de cogénération fonctionne au biométhane obtenu à partir des déchets générés, la production de chaleur de MTS est de : 91 353 kWh/a et celle de VHD de 79 473 kWh/a.

Des véhicules de type Smart ED et BMW i3 ont été utilisés. Les critères de sélection étaient les suivants :

- Possibilité de contrôler les charges (puissance de charge temporelle).
- Potentiel d'optimisation grâce à la plus grande capacité possible de charger et aux performances de la batterie.
- Compatibilité avec le système de réservation.

- Facilité d'utilisation (y compris la couverture, l'espace de chargement, le confort).

La promotion de l'électromobilité se fait via un système de voiture partagée, fonctionnant via un système de réservation régulant l'accès aux véhicules. Un échange entre le système de réservation et le système de gestion de l'énergie des logements optimise les temps de charge et tire parti de la production photovoltaïque. Le système de réservation est limité aux personnes utilisant une application de réservation contenant des données clés sur le véhicule, telles que l'état de charge du véhicule... Pour ouvrir et fermer les portières du véhicule, un lecteur RFID a été installé, l'utilisateur a également accès aux réservations planifiées et à la facturation des trajets. Les utilisateurs ont été invités à planifier leurs voyages et à l'avance pour pouvoir bénéficier d'un tarif réduit.

Dans ce projet les coûts sont optimisés car la consommation est couverte au maximum par l'électricité générée sur le site par la cogénération ou le système photovoltaïque. L'utilisation de l'électricité produit localement et de la chaleur élimine la nécessité de recourir à du stockage stationnaire et limite les pertes de transport, rendant ainsi le système plus économe en énergie. Les composantes du système énergétiques sont les suivantes : un système photovoltaïque en tant que générateur non contrôlable, CHP (Combined Heat and Power) en tant que générateur contrôlable, des stations de recharge pour véhicules électriques en tant que consommateurs contrôlables d'électricité et des maisons en tant que consommateurs non contrôlables d'électricité et de chaleur.

La valeur ajoutée du projet provient du couplage avec la production locale et de l'optimisation du système de cogénération contrôlable, en augmentant l'efficacité du système photovoltaïque incontrôlable et la consommation des habitats. Un élément différenciant du projet est l'utilisation de la cogénération qui améliore l'efficacité du système énergétique. Lorsque la recharge du véhicule est lancée, le CHP est activée pour réduire les pertes et récupérer l'énergie potentielle pour un usage domestique. La production locale est dans ce cas plus rentable que la production non locale.

Les opportunités d'un couplage local ou non local dépendent ainsi de la capacité technique du projet et des objectifs proposés. La production locale favorise l'autoconsommation et l'introduction du véhicule électrique augmente la part des énergies renouvelables dans l'autoconsommation. Toutefois, la production locale n'est pas viable dans toutes les conditions car il est nécessaire de disposer d'un potentiel solaire suffisant pour rentabiliser les installations. L'appel à des énergies renouvelables distantes par une connexion au réseau de distribution semble le plus souvent nécessaire.

[REX 7.1] : L'utilisation de production d'EnR locale pour la charge des véhicules réduit les pertes dues au transport d'énergie.

[REX 7.2] : Les systèmes de production d'EnR locaux peuvent être plus rentables grâce à l'autoconsommation et à l'introduction de la cogénération principalement pour satisfaire des consommations non-contrôlables telles que celles des maisons individuelles.

[REX 7.3] : L'introduction du véhicule électrique augmente la part des énergies renouvelables dans l'autoconsommation du fait d'un couplage effectif. Le pilotage des charges augmente cette part.

[REX 7.4] : L'opportunité d'un couplage local des charges avec la production d'EnR dépend des conditions géographiques du lieu de charge et des potentiels de production disponibles durant les périodes de charge.

8. Synchroniser les charges avec la disponibilité d'EnR favorise t'il systématiquement l'impact sur l'environnement ?

La synchronisation de la production d'énergies renouvelables et la recharge du véhicule électrique augmentent la proportion d'énergies renouvelables dans le véhicule, ce qui permet de varier les débouchés pour les EnR et de diminuer émissions.

Cependant, le modèle de couplage et les flexibilités des charges doivent être développés avec soin afin de ne pas générer d'effets pervers. Dans le cas du projet **SEEV4** l'introduction d'un système de recharge intelligente statique s'est montré contre-productif car les émissions de CO2 augmentaient.

En comparant la fourniture d'électricité en énergie solaire, éolienne et la demande d'énergie du véhicule électrique pendant une période de temps, les analyses faites en 2016 indiquent la production combinée d'électricité solaire et éolienne a dépassé à de nombreuses reprises la demande d'électricité provenant des VE. Cette surproduction d'EnR crée un impact négatif sur les émissions de CO2 car la répartition des charges des VE ne permet pas d'absorber le potentiel énergétique aux moments espérés limitant la capacité des EnR à couvrir totalement les charges qui se placent à des périodes où le mix énergétique est moins favorable. Une détermination statique des flexibilités proposées a ainsi limité les possibilités de synchronisation des charges avec les EnR créant des surproductions et limitant le transfert des EnR dans les charges.

Contrairement au projet SEEV4, le projet **3EMFH** a montré de que la production locale dans les deux logements analysés a donné des résultats plutôt favorables. Dans le cas des habitats VHD en comparant les émissions annuelles de CO2 équivalentes à la fourniture de d'électricité, de chaleur et d'énergie pour la mobilité, il y a une économie de 36% ou 16,7 t d'équivalent CO2 par an par rapport à la situation de base. Si le gaz naturel acheté est remplacé par du biométhane dérivé de la biomasse, les économies peuvent être portées à 58%.

Dans les logements MTS : Les émissions de CO2 équivalentes diffèrent considérablement de celles du VHD. Ceci est principalement dû à la faible autoconsommation et un nombre limité de participants. Par conséquent, l'énergie appelée du réseau est proportionnellement plus élevée. Dans le cas des essais sur le terrain du projet 3E utilisant du biométhane issu de déchets, les émissions de gaz à effet de serre sont réduites de 196% par rapport à un bâtiment classique.

Les exemples précédents montrent que le modèle de recharge intelligente choisi ainsi que le système énergétique mobilisé sont décisifs quant à l'impact sur l'environnement. Dans le premier cas, le modèle de recharge intelligente génère une grande perte d'énergie, donc des impacts environnementaux négatifs notamment sur la production de CO2 en ville. Dans le second cas, des résultats positifs sont obtenus grâce au modèle de charge et surtout grâce au système de cogénération qui permet de réduire les pertes et de tirer pleinement parti de la production locale.

Les potentialités de flexibilité des charges étant parfois limitées du fait des mécanismes de pilotages et des objectifs d'optimisation choisis, pour réduire les impacts sur l'environnement, il est nécessaire de disposer d'un nombre important de véhicules électriques capables d'être mobilisés pour absorber les productions issues des EnR, faute de quoi la production d'EnR restera excédentaire et les charges continueront à s'effectuer en partie hors des périodes de production.

Le couplage représente donc un intérêt pour la réduction des effets du changement climatique, à condition qu'il existe un nombre important de véhicules avec une grande flexibilité de charge. La synchronisation des charges et la production d'énergie renouvelable peuvent alors être favorables et réduire la production de CO2.

[REX 8.1] : Le dispositif de pilotage des charges est un élément important qui détermine la part d'EnR consommée par le véhicule et réduisent donc son impact sur l'environnement.

[REX 8.2] : Le Smart Charging ne conduit pas nécessairement à un couplage optimal des charges avec la production d'EnR. Il est nécessaire d'intégrer des modèles flexibles d'optimisation pour assurer une plus grande disponibilité des charges durant les périodes de production d'EnR variables afin de limiter les surproductions et de réduire la part des charges s'effectuant lors des pics de demande.

[REX 8.3] : Pour que le couplage local soit plus vertueux une source de consommation d'énergie quasi constante ou un grand nombre de véhicules électriques sont nécessaires afin de faciliter la mise en œuvre des flexibilités. Sans modalités de stockage, un couplage sur une maille plus étendue apparaît plus facilement réalisable et plus vertueux.

- **Système d'optimisation de charge**

La recharge intelligente peut être mobilisée pour améliorer la synchronisation de la production d'énergie renouvelable et la recharge du véhicule électrique par le biais de mécanismes de flexibilité visant principalement le pilotage des charges en fonction des prévisions de production d'énergie et des besoins et de la disponibilité du véhicule.

Ce concept, plutôt complexe, nécessite un système de communication permettant l'échange d'informations afin de coordonner le positionnement des charges en fonction de la disponibilité de l'énergie.

Le potentiel du Smart Charging peut être augmenté en l'associant à de nouvelles technologies telles que le V2G qui confère au véhicule électrique une nouvelle utilisation en tant qu'élément de stockage d'énergie stabilisant et réduisant l'impact sur les réseaux locaux des fluctuations des productions et des demandes. L'intérêt de la technologie V2G réside dans le fait que le véhicule peut capter de l'énergie aux heures de grande production d'EnR grâce à sa flexibilité de charge contribuant à réduire l'impact de l'intermittence, et à réinjecter l'énergie aux heures où la consommation est plus élevée réduisant l'appel à des moyens de production coûteux et ayant un bilan environnemental moins favorable.

9. Quel est le modèle ou le mécanisme de flexibilisation le plus adapté pour promouvoir le couplage ?

La définition du modèle de flexibilité des charges conditionne le volant d'énergies renouvelables mobilisé pour la recharge du véhicule électrique mais peut également avoir des conséquences sur les profils de charge des utilisateurs ainsi que sur leurs habitudes de mobilité.

Le projet **Demand Response, Das Auto als aktiver Speicher und virtuelles Kraftwerk** aborde cette question en détail. L'objectif du projet, est le développement de dispositifs contrôlant le comportement des utilisateurs afin que la mobilité électrique puisse contribuer de manière significative à la stabilisation du système d'alimentation électrique. Le projet comprend différents acteurs privés, des établissements d'enseignement et du secteur public.

À cette fin, le projet propose de mesurer l'acceptation de dispositifs de flexibilité innovants afin de trouver un business model innovant. Différents dispositifs incitatifs de flexibilité sont proposés et le comportement des utilisateurs est analysé pour évaluer leur efficacité.

Le projet a mis à disposition une flotte de 10 véhicules électriques à 30 participants. La flotte de véhicules était contrôlée par une centrale virtuelle. 3 points de

chargement ont été définis, au domicile, dans l'entreprise et dans les espaces publics. L'expérimentation a testé 4 types de dispositifs de recharge.

Dispositif 1 : Straight-Shop, Charge libre

Ce dispositif simule un système d'alimentation en énergie dans lequel il n'y a pas d'incitations pour modifier le comportement des utilisateurs. La charge est continue en fonction du besoin de l'utilisateur. Ce dispositif sert de référence pour évaluer les effets des incitations. La charge du véhicule commence dès qu'il est connecté à la borne. Aucune incitation n'est transmise aux utilisateurs.

Dispositif 2 : SMART1, heure creuse fixe méridienne

Dans ce dispositif les utilisateurs avaient le choix d'effectuer leur charge à des périodes fixées à l'avance qui correspondaient à un flux d'énergie renouvelable simulé (de 11h à 15h pour coupler avec du PV). Le système de tarification donne une prime journalière si l'utilisateur opte pour cette charge à heure fixe. Le test porte sur le choix que fait l'utilisateur d'opter pour une charge fixe (SMART1) ou une charge libre (Starit-Shop). La charge SMART1 simule une heure creuse méridienne.

Dispositif 3 : SMART2, charge flexible couplée

Ce dispositif met en place un appel à des charges flexibles en fonction des fluctuations de la disponibilité de la production d'électricité provenant des énergies renouvelables. Les utilisateurs devaient décider sur une stratégie de charge en sélectionnant des périodes de charge dépendant de la disponibilité prévue des EnR dans un magasin virtuel. Les temps de charge couplés ont été choisis en fonction des prévisions de puissance des productions d'EnR. Ces périodes se modifiaient chaque jour et faisaient l'objet d'une prime journalière supérieure à celle de la charge à heure fixe (SMART1). Pour tester ce dispositif les utilisateurs pouvaient choisir une charge libre, une charge à heure fixe et une charge flexible.

Dispositif 4 : SMART3, Charge flexible et décharge pour des services réseau

Les charges des véhicules sont totalement flexibles. Ce dispositif simule aussi une décharge de la batterie jusqu'à 50%. L'idée du dispositif 4 est de tester les capacités de stockage d'énergies renouvelables des véhicules électriques que la centrale virtuelle peut mobiliser afin de les valoriser sur le réseau. Le système tarifaire incitatif est identique à celui du dispositif 3 mais tient compte de l'état de charge final et de la durée de branchement pour distribuer la prime (50% de charge et 7 heures de branchement, 75% de charge et 9 heures de branchement, 100% de charge et 13 heures de branchement).

La figure 25 montre qu'au cours de la période de référence, le profil de charge des véhicules sont libres et dépendent des séquences de branchement des véhicules. Les charges s'effectuent alors plutôt dans la soirée augmentant la consommation de pointe.

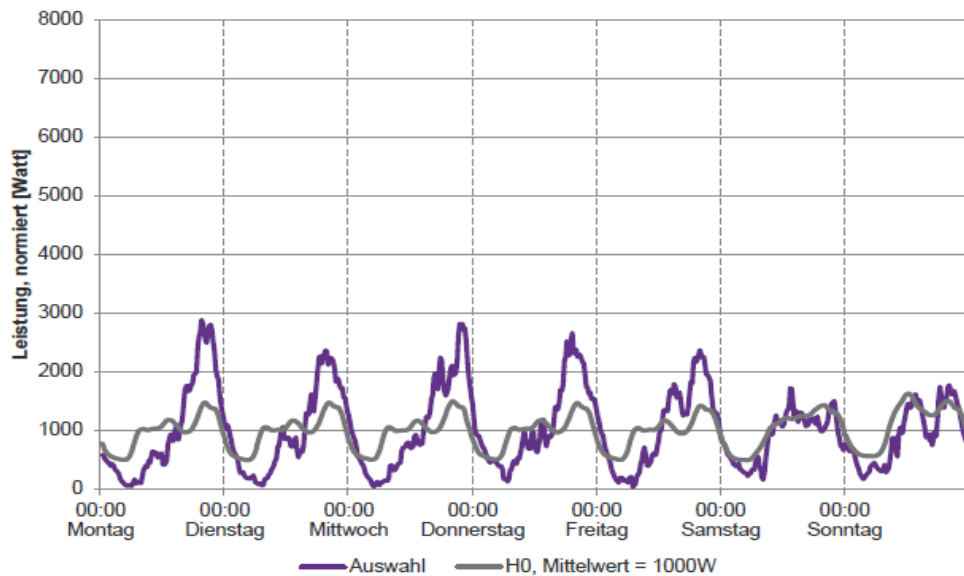


Figure 25. Courbe de charge du dispositif 1. En abscisse les jours de la semaine, ligne violette les charges des VE, ligne grise la consommation moyenne

Dans le dispositif 2, le modèle de charge SMART1 est proposé avec la charge libre deux plages horaires étaient proposées de 22h à 18h et de 11h à 15h. Par conséquent à 22h15 et 11h15 une augmentation de la courbe de charge peut être constatée. La charge de nuit reste élevée pendant environ 3 heures car après beaucoup de voitures sont complètement chargées et la puissance de charge tombe à nouveau.

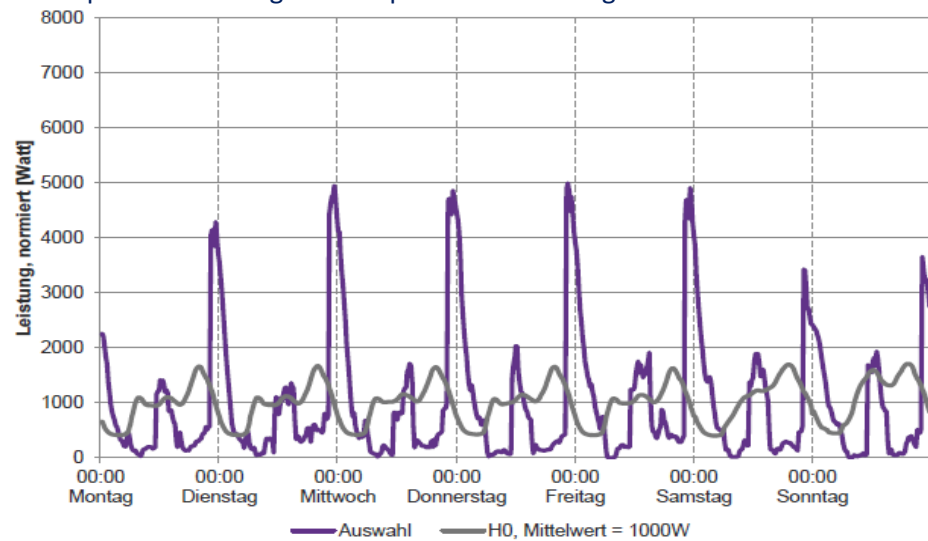


Figure 26. Courbe de charge Dispositif 2. En abscisse les jours de la semaine, ligne violette les charges des VE, ligne grise la consommation moyenne.

Dans le troisième dispositif, l'option de chargement SMART2 est souvent utilisée. Les trois heures de charge garanties par la nuit ont été positionnées entre 0 et 6 heures. Par conséquent, une très forte augmentation des charges est constatée après minuit. Les temps de charge restant ont été placés selon la production d'énergie renouvelable estimée. Le potentiel de charge restant a été plutôt positionné autour de midi.

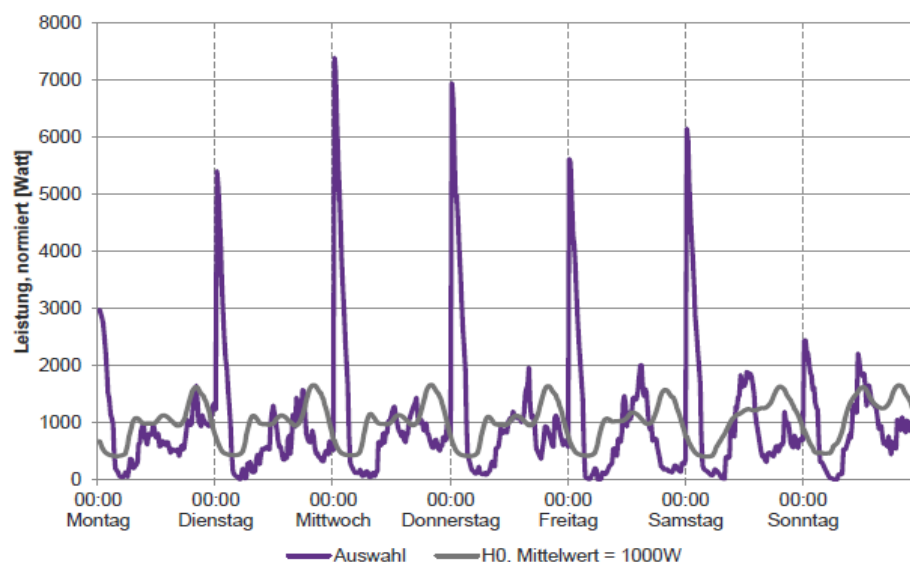


Figure 27. Courbe de charge du dispositif 3. En abscisse les jours de la semaine, ligne violette les charges des VE, ligne grise la consommation moyenne.

Durant le test du dispositif 4, les options de charge SMART2 et SMART3 ont à peu près la même fréquence de sélection. Le pic de charge présent après minuit provient des 3 heures de charges garanties entre 0h et 6h dans le SMART2 alors que le SMART3 les proposaient à partir de 12h00.

La charge résiduelle proposée par l'option Smart3 permet de contrôler à la fois les creux de charge de nuit du profil de charge standard, et d'augmenter le nombre d'opérations de charge effectuées en période de fort approvisionnement en sources renouvelables.

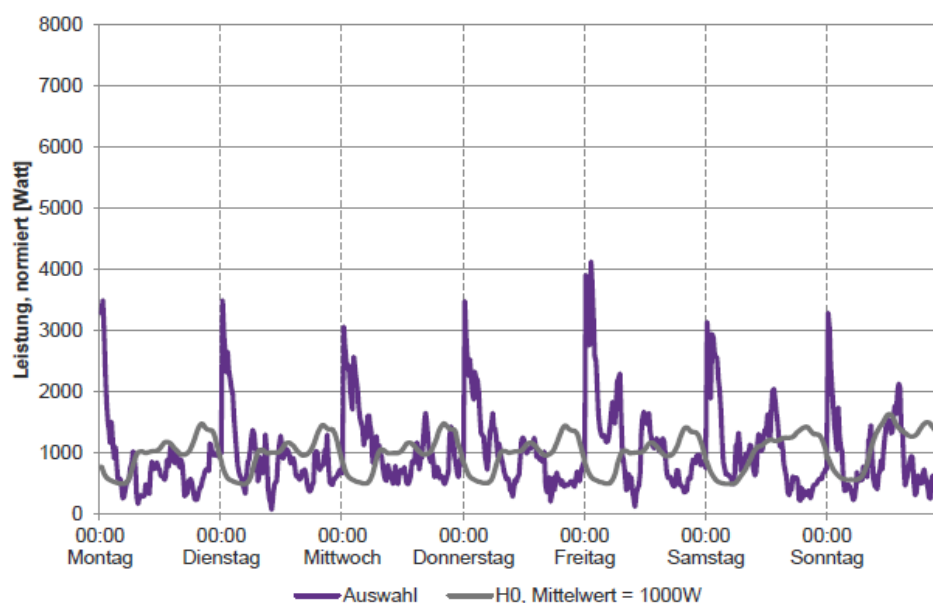


Figure 28. Courbe de charge du dispositif 4. En abscisse les jours de la semaine, ligne violette les charges des VE, ligne grise la consommation moyenne.

Parmi les facteurs importants qui ont guidé le choix d'une option de charge figurent les incitations mais aussi les contraintes imposées sur les flexibilités individuelles, ainsi que sur le besoin d'avoir un système le plus transparent et simple possible. Les résultats suggèrent que les options de charge les plus flexibles conviennent particulièrement aux personnes ayant le moins de besoin de locomotion spontanée.

Les essais effectués sur le terrain ont montré que les options SMART2 et SMART3 étaient acceptables. Les participants qui ont choisi ces options l'ont fait en raison d'une conscience environnementale qui les amènent à valoriser le couplage. La présence d'incitations financières supérieures pour ces deux options est aussi une motivation supplémentaire. Les dispositifs de flexibilités fondées sur le couplage avec les renouvelables et des dispositifs incitatifs sont donc favorablement accueillis malgré les implications plus fortes des utilisateurs dans les choix de charge.

Selon la perception des usagers, le modèle de charge préféré a été l'option SMART2 en raison d'une plus grande facilité d'utilisation quotidienne. Les utilisateurs ont insisté sur le fait que le modèle devait être facile à utiliser pour avoir une meilleure acceptabilité. La seconde option préférée a été l'option SMART3 en raison de la compensation financière supplémentaire que les participants ont pu obtenir pour leur contribution au réseau. L'option SMART1 reste la plus simple, mais la moins intéressante. Ceci montre que le signal incitatif n'est pas négligeable dans l'orientation des choix des utilisateurs et qu'il est un bon instrument pour valoriser les changements et les contraintes imposées par le couplage.

Le projet présenté montre un effort très intéressant pour créer un modèle de flexibilité qui réponde aux besoins des utilisateurs. C'est un bon exemple pour aborder les intérêts des utilisateurs et se renseigner sur l'adaptabilité à ces modèles. Ce projet propose différents mécanismes de flexibilité, qui permettent d'apprécier le comportement des utilisateurs face aux différents scénarios proposés. L'évaluation des différentes options de flexibilité permet de disposer d'éléments pour élaborer des services plus attractifs aux utilisateurs et de définir des modèles d'affaires fondés sur le couplage qui sont plus pertinents.

[REX 9.1] : La prise en compte du comportement des utilisateurs permet de proposer des options de flexibilité adaptables aux besoins de chacun.

[REX 9.2] : Un menu d'options semble préférable à une seule option. Proposer une échelle de flexibilité permet de révéler les préférences des personnes pour adopter un comportement de charge, ce qui précise l'estimation des besoins de charge à un moment donné.

[REX 9.3] : Les incitations financières à la flexibilité sont un élément important pour engager les utilisateurs dans des changements de comportement. La valorisation environnementale des comportements et par conséquent les potentialités de couplage des charges avec les EnR sont des éléments complémentaires qui augmentent l'offre de flexibilité de la part des usagers.

[REX 9.4] : La simplicité des options et les facilités d'apprentissage des stratégies de charge est un élément primordial de l'engagement à long terme dans des dispositifs de flexibilité et de couplage.

10. La flexibilité de la charge est-elle nécessaire pour optimiser le couplage des énergies renouvelables et la recharge des véhicules électriques ?

L'introduction de la recharge intelligente génère systématiquement une augmentation de l'utilisation des énergies renouvelables. Dans le projet **Emilippe** déjà décrit, la stratégie de recharge intelligente dépend d'un algorithme basé 5 étapes :

1. Détermination de la période de planification en fonction des exigences de réserve.
2. Obtention des prévisions PV de la période par intervalles de 15 minutes.
3. Détermination des réservations actives chaque 15 minutes.
4. Répartition de l'énergie photovoltaïque dans les intervalles spécifiés.

5. Réapprovisionnement de la demande en énergie encore manquante sur la troisième source d'énergie, telle que la batterie ou le réseau d'énergie.

Sur la figure 29, avec l'introduction de la recharge intelligente, la part des énergies renouvelables pour recharger le véhicule augmente. Cela est dû au fait que, grâce au système de réservation, il est possible d'estimer la recharge des véhicules en réduisant les heures de charge pour éviter surcharger le système avec plusieurs véhicules à la fois.

Dans cette figure, deux options sont prises en compte, le premier scénario est la recharge normale où seulement 18% d'énergies renouvelables peuvent être absorbés et 49% dans la seconde. Grâce à la recharge intelligente et au déplacement de l'heure de recharge du deuxième véhicule (flexibilité de charge), la partie d'énergie renouvelable peut être augmentée de 18% à 37% pour le premier véhicule et de 49% à 96% pour le second. Avec la batterie, l'augmentation est de 100% dans les deux cas.

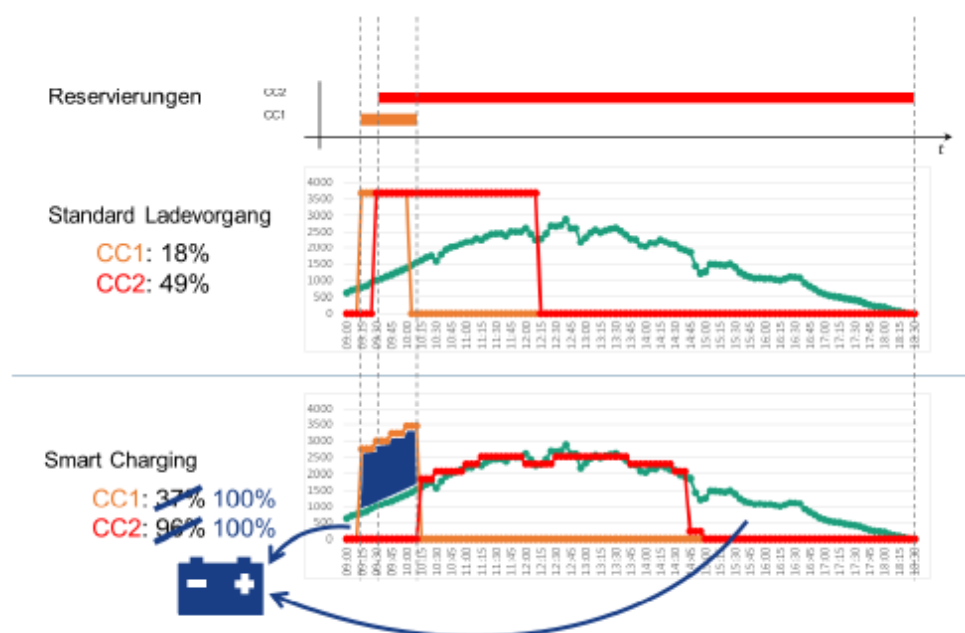


Figure 29, Comparaison entre la charge régulière et la charge intelligente

La recharge intelligente permet d'augmenter la part d'EnR consommée dans les véhicules, grâce au système de gestion de la mobilité et aux informations partagées entre les entreprises. Dans ce cas, la recharge intelligente permet non seulement d'accroître la part des énergies renouvelables dans le véhicule, mais la décision d'utiliser la batterie fixe couvre de manière adéquate le pourcentage de charge restant hors des périodes de production d'EnR, grâce à l'absorption de la surproduction d'EnR.

Toutefois, l'échange d'informations sur le parc de véhicules est crucial, car il permet au système d'estimer correctement les besoins des véhicules et l'énergie nécessaire pour les charger, ainsi que de programmer les charges en fonction de la durée de stationnement du véhicule. Un système de recharge intelligent nécessite un échange d'informations continu entre le système énergétique et le système de gestion et de planification de mobilité. Les prévisions établies permettent de satisfaire les besoins de charge des véhicules, ainsi que d'estimer la puissance nécessaire qui va être requise des réseaux externes, ce qui permet d'anticiper un surdimensionnement des réseaux ou estimer une extension du système de production d'énergie local.

Cette approche convient particulièrement à l'optimisation du couplage d'une flotte de véhicules électriques appartenant à des entreprises, car ils sont facilement

contrôlables et plus d'informations peuvent être capturées et mobilisées en temps réel.

L'introduction d'une batterie stationnaire augmente le potentiel du système et compense les sollicitations de charge en absence de production d'énergie renouvelable. Toutefois, l'optimisation du couplage repose sur une grande précision des prévisions de mobilité. L'engagement des utilisateurs est donc nécessaire pour obtenir les meilleurs résultats.

[REX 10.1] : La flexibilité de recharge et la recharge intelligente permet d'augmenter la quantité d'énergie renouvelable dans le véhicule électrique et améliore la performance du couplage des charges avec les EnR.

[REX 10.2] : La présence d'un stockage stationnaire permet d'atténuer les problèmes d'intermittence de la production d'énergie renouvelable et favorise le couplage au-delà des périodes de production des EnR.

[REX 10.3] : La prévision la plus précise possible des durées de stationnement des véhicules est essentielle pour optimiser le couplage. Ainsi les contextes professionnels où les mobilités et les horaires sont prévisibles ou déclarés dans des systèmes d'information fournissent des données précieuses pour élaborer des algorithmes performants et faciles d'utilisation.

11. Pour garantir le couplage ENR et VE, une centrale virtuelle est-elle nécessaire ?

Une centrale virtuelle est une combinaison de différentes unités de production d'électricité décentralisées, agrégées dans un système d'information centralisé afin de les piloter comme une seule unité en fonction de la demande en énergie. Deux projets traitent de cette question.

Le premier projet est **Well2Wheel** un projet allemand axé sur la création d'une centrale virtuelle afin d'optimiser la consommation d'énergie dans des résidences. Une flotte de véhicules particuliers a été mobilisée pour tester un dispositif de pilotage des flexibilités reposant sur un signal lumineux indiquant en rouge et vert les moments les plus propices pour recharger le véhicule en fonction des opportunités de couplage avec de la production d'EnR.

Le projet a plusieurs objectifs. Générer une électricité durable. Incorporer les sources renouvelables dans une centrale électrique virtuelle. Modéliser et visualiser la disponibilité d'électricité renouvelable. Transmettre cette information aux utilisateurs via différents supports de communication. Intégration de la charge des véhicules électriques dans le réseau de distribution.

La centrale virtuelle envoie des signaux en rouge et vert en fonction des périodes de forte production d'EnR dans lesquelles les charges des véhicules électriques et les consommations domestiques peuvent être couplées.

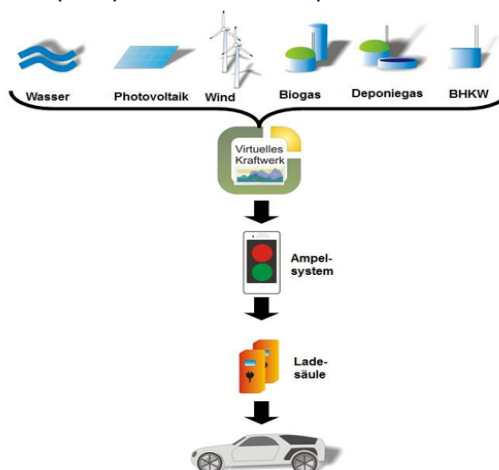


Figure 30, Schéma de l'échange virtuel de la production au véhicule.

Les résultats finaux du projet indiquent que même si les personnes répondent au signal pour recharger le véhicule, elles préfèrent des modalités de coordination plus faciles à adopter et à anticiper. Les centrales virtuelles représentent aussi une dépense considérable qui pèsent fortement dans le bilan financier du projet, notamment lorsque celui-ci est local. Un soutien financier public est donc nécessaire pour développer des projets de cette ampleur. Dans ce projet un système de tarification basé sur les phases rouge-vert par un jeu de bonus, semble être intéressant pour les utilisateurs et pour rentabiliser le système.

L'autre projet répondant à la question est le projet **Demand Response**. Une des conclusions du projet est que l'intégration des véhicules électriques dans une centrale virtuelle visant à valoriser la flexibilité des charges n'est pas viable en raison du prérequis réglementaire existant aujourd'hui. Les limitations résident dans le marché de l'énergie où une centrale virtuelle fonctionnant en temps réel modifie la dynamique de la négociation du marché de l'énergie en Allemagne.

Ainsi à court terme, une centrale virtuelle virtuelle n'est pas nécessaire puisqu'il est possible de générer autrement le couplage d'énergies renouvelables et de recharger les véhicules dans des conditions technologiques plus simples et plus abordables, surtout pour des projets locaux de petite envergure. L'investissement dans une centrale virtuelle se justifie plutôt pour des projets de couplage non local qui nécessiteraient d'agréger de nombreuses sources d'EnR sur un large périmètre afin d'optimiser les opportunités de couplage.

[REX 11.1] : L'utilisation de centrales virtuelles n'est pas indispensable pour le couplage des énergies renouvelables et la recharge du véhicule.

[REX 11.2] : La centrale virtuelle est encore en phase de maturation et l'introduction d'un système de cette ampleur implique un investissement important qui pèse sur la rentabilité de projets de couplage au niveau local.

[REX 11.3] : Les centrales virtuelles répondent mieux à l'agrégation de sources renouvelables diversifiées et nombreuses sur des périmètres géographiques plus larges. Elles semblent plus efficaces pour optimiser le potentiel d'un couplage non local.

- **Système de stockage d'énergie**

Les batteries fixes et les batteries de véhicules jouent un rôle clé dans la performance des systèmes d'énergie renouvelable, l'une des limites des EnR sont qu'elles ne sont pas facilement stockables. Les batteries constituent alors une précieuse source de stockage permettant l'utilisation de l'énergie stockées aux moments de forte demande ou aux moments où les charges ne peuvent pas être directement couplées avec la production d'EnR.

12. Est-il nécessaire d'avoir un système de stockage d'énergie pour augmenter la partie de renouvelables utilisée pour la recharge de VE ?

L'intérêt d'une batterie stationnaire dans le cadre du couplage est d'alimenter les charges qui ne peuvent être placées lors des périodes de production des EnR. La batterie stationnaire peut ainsi étendre le couplage EnR à des charges non synchronisées. Le projet 3EMFH fournit des éléments de réponse. La taille de batterie de stockage stationnaire dépend de la capacité installée du système photovoltaïque. Le surdimensionnement de la batterie n'est pas économiquement utile avec les coûts d'investissement actuels. En outre, cette capacité supplémentaire à des fins

d'optimisation ou de services liés au réseau n'ajoute pas de valeur dans le cadre réglementaire actuel de l'Allemagne. La valorisation des services réseau du stockage stationnaire est une question importante permettant une valorisation des investissements en dehors de la problématique du couplage.

Selon les tests effectués sur des batteries stationnaires, presque aucune énergie photovoltaïque n'a été stockée en hiver, puisqu'elle a été consommée immédiatement. Pendant cette période, une utilisation différente du système de stockage est donc proposée. Un effet positif des batteries stationnaires peut être trouvé dans le soulagement du réseau local, en permettant une plus sollicitation des stations de charge sans faire appel au réseau.

Le stockage stationnaire par batterie permet de réguler le système énergétique local en compensant les excédents et les déficits d'énergie qui sont plus fréquents à cette maille du réseau. La batterie joue comme une réserve de sauvegarde. Lorsque le véhicule est connecté, le surplus de production est absorbé par la charge le véhicule. Si une production excédentaire persiste le surplus restant est stocké dans les batteries. Lorsque la demande s'accroît notamment durant le pic de demande domestique la batterie est déchargée.

La figure 31 montre les pertes fictives avec une production excédentaire d'électricité. La première période est un excès d'énergie photovoltaïque. La deuxième période correspond à la durée de fonctionnement de la cogénération optimisée en fonction des informations de réservation au moment du départ.

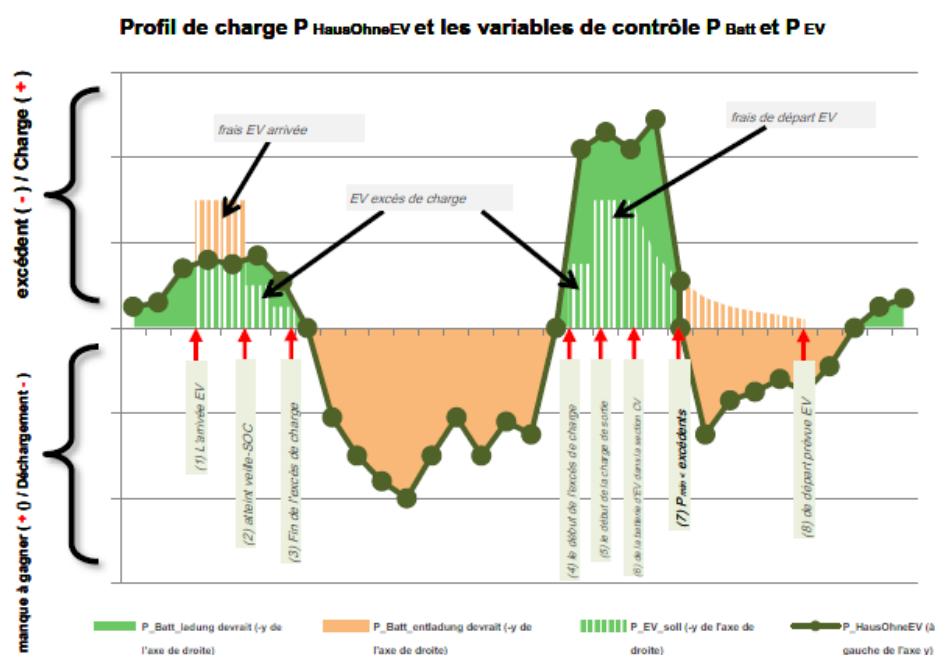


Figure 31 : profil de charge des véhicules électriques et batterie stationnaire.

La figure 31 montre 8 situations différentes :

1. Le véhicule arrive à la station de charge et est chargé immédiatement pour obtenir le SOC en attente.
2. La puissance de charge est réduite jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de surplus.
3. Il n'y a pas de charge du véhicule jusqu'à la prochaine période excédentaire.
4. L'excès de puissance commence
5. Le chargement du SOC sortant commence
6. La puissance de charge est réduite par le système de gestion de la batterie du véhicule.
7. La phase d'opération du CHP se termine

8. Sortie de véhicule

Dans la figure, les zones vertes sont des phases de chargement, les zones orange sont des phases de décharge. Les zones rayées représentent les phases de charge de la voiture électrique. Le stockage de batterie fixe doit compenser les excédents (zones vertes) et les restantes (zones orange) résultant de la charge et de la décharge d'énergie.

Selon la perception des participants au projet, les résidents conviennent que la transition énergétique se fera à partir de la production d'énergie de manière décentralisée, produite localement, et non par le biais grandes centrales. Le couplage des énergies renouvelables et la recharge du véhicule électrique est accueilli avec intérêt par les participants. Le fait que le véhicule est chargé avec des énergies renouvelables incite les habitants à mieux utiliser l'énergie.

Ce projet nous permet de voir que la batterie est un élément important dans le couplage au niveau local car elle permet de faire face à la plus grande variabilité des productions et des demandes et améliorer les performances du système notamment en terme d'utilisation de la production d'énergie excédentaire. Selon le lieu de charge, l'installation d'une batterie fixe apparaît nécessaire, comme dans les résidences s'il n'y a pas de présence du véhicule pendant le jour pour absorber l'énergie.

Cependant, dans les endroits où la pénétration de véhicules est plus grande et où il est le potentiel de flexibilité des charges est plus important le recours à un système de stockage stationnaire est moins nécessaire. Dans le cas des entreprises, les véhicules personnels sont souvent stationnés durant la journée et absorbent généralement la production d'énergie renouvelable générée par les EnR durant ces périodes. Sinon l'excédent peut le plus souvent être consommé par les bâtiments.

[REX 12.1] : L'utilisation de batteries fixes améliore le couplage et augmente la part d'énergie renouvelable dans le véhicule, mais son utilisation augmente les coûts du système énergétique.

[REX 12.2] : L'utilisation de batteries peut être limitée dans une situation locale d'autoconsommation de l'énergie produite afin d'éviter les pertes d'énergie.

[REX 12.3] : Selon le développement des productions d'EnR et du parc de véhicule électrique, les opportunités de couplage peuvent se résoudre par un développement du Smart Charging.

[REX 12.4] : Le stockage apparaît comme intéressant qu'en présence d'une forte production excédentaire ne pouvant être absorbée par des charges ou plus généralement par une demande s'exprimant à une maille supérieure du réseau. Dans ce cas les coûts de transport, de renforcement ou d'écêtement nécessaires pour traiter ces situations de forte production excédentaire doivent être arbitrés avec les coûts d'investissement dans le stockage.

13. Les charges changent-elles avec la taille des batteries ? Cela a-t-il une influence sur les opportunités de couplage ?

Le projet **SEEV4**, a utilisé des véhicules avec une batterie de 40 kWh. Ce choix a été fait en fonction afin d'anticiper l'augmentation du nombre de véhicules électriques, et l'augmentation des performances du véhicule.

La taille de la batterie est un facteur qui modifie les comportements de charge. La taille de batteries change le temps de charge en fonction de sa capacité de l'autonomie et la fréquence de charge.

	Charging sessions per week	Mean volume per session (kWh)
FEV large (>40kWh)	2.4	35.7
FEV small (<40kWh)	3.7	10.9

Figure 32. Comportement de charge par taille de véhicule

Un véhicule avec une grosse batterie prend plus de temps de charge, quel que soit le type de borne avec une charge lente accélérée ou rapide. De plus, la taille de la batterie change les besoins énergétiques de charge. Les tailles de batterie influent sur le choix d'utiliser la capacité de production locale ou de se connecter au réseau traditionnel pour obtenir une recharge complète.

La figure 32 montre qu'un véhicule ayant une grande taille de batterie a une fréquence de charge plus faible qu'un véhicule ayant une batterie de petite taille, cependant la puissance nécessaire pour la recharge dans chaque session de charge est trois fois plus grande en kWh que la demande d'un véhicule avec une batterie de moins de 40 kWh.

Il est évident que la taille de la batterie influe sur le type de couplage. Plus la demande en énergie est élevée, plus il est nécessaire d'augmenter la capacité de production solaire ou éolienne, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts. Face à cette question, il convient de s'interroger sur l'utilisation de batteries de grande capacité, quand la plupart des trajets quotidiens sont effectués dans une tranche moyenne de 5 à 50 km, trajets qui peuvent être effectués avec un véhicule dont la batterie est inférieure à 40 kWh.

[REX 13.1] : Des batteries de plus grande capacité diminue la fréquence de charge des véhicules, et augmente la durée de charges.

[REX 13.2] : Plus la taille de la batterie est grande, plus la puissance nécessaire pour répondre à ses besoins de charge est grande. Dans une perspective de couplage cela nécessite une augmentation de la capacité des énergies renouvelables installées.

[REX 13.3] : L'augmentation de la capacité des batteries correspond à une demande d'autonomie des utilisateurs qui est majoritairement déterminée dans un environnement où la couverture du réseau de recharge est faible, mais n'est pas forcément liée à des besoins de mobilité quotidiens.

14. Est-ce que l'implémentation du V2G change les opportunités de d'utilisation d'une batterie de stockage stationnaire, favorise l'équilibre entre la production d'énergie et la recharge du véhicule ?

Le projet de recherche **e-carPark**, axé sur l'amélioration de l'efficacité énergétique dans une zone industrielle, a été développé en même temps que la création du parc industriel. Le projet s'est concentré sur les possibilités d'intégrer la mobilité électrique dans les zones industrielles.

L'objectif du projet est d'identifier l'intérêt de la production d'énergie dans les zones commerciales dont l'efficacité énergétique pourrait être améliorée par l'utilisation des capacités de stockage des véhicules électriques. Pour répondre à cette question, l'ensemble du système énergétique a été pris en compte, y compris la production locale et un système de cogénération thermique. Le projet s'est concentré sur l'identification des opportunités du véhicule en tant que source de stockage d'énergie pour fournir un service au réseau.

Selon les analyses effectuées, il a été identifié que :

Avec une production photovoltaïque prévue de 1 527 000 kWh, une puissance installée de 1 360 kW sur une surface de 9 500 m², et 19 aérogénérateurs de moins de 10 kW (petite turbine) la production prévue est de 73 500 kWh/a, avec une puissance installée 50 kW.

L'évaluation du stockage effectuée par simulation a révélé que sur environ 64 250 kWh d'électricité excédentaire, environ 31 870 kWh pourraient être stockés dans les véhicules électriques. La répartition est d'environ 27 260 kWh pour les véhicules de fonction des entreprises de la zone industrielle et environ 4 610 kWh pour les véhicules du personnel.

En utilisant le V2G, environ 49,6% de l'électricité excédentaire peut être réinjecté dans le parc ou utilisé pour la mobilité. Les 32 380 kWh restants devraient être renvoyé au réseau électrique national ou chercher d'autres formes de stockage.

Pour un projet d'une telle ampleur, le nombre de véhicules n'est pas suffisant pour absorber la surproduction d'énergie. Cependant, les tests montrent que le véhicule électrique a de grandes opportunités comme source de stockage puisqu'il permet de capter environ 50% de l'énergie qui pourrait impacter le réseau. Cette énergie peut être consommé localement dans la zone par le véhicule, ce qui réduit son impact de réseaux local.

Dans l'ensemble des projets, nous pouvons constater que le couplage des EnR avec le VE dépend de nombreux aspects techniques qui complexifient son optimisation. En fonction du lieu de charge, la synchronisation peut être spontanée et se présenter de manière naturelle comme dans le cas du couplage diurne dans les espaces de travail. Pour autant dans d'autres cas de figure, l'efficacité du couplage peut être améliorée par le Smart Charging et le V2G en permettant de valoriser l'énergie stockée dans les véhicules électriques pour des services diversifiés qui ne sont pas uniquement liés aux besoins de mobilité.

[REX 14.1] : Le lieu de charge détermine la plupart des variables impliquées dans le couplage. La présence du V2G permet de valoriser le temps de connexion des véhicules électriques par des services réseau ou un transfert d'électricité d'origine renouvelables vers d'autres lieux de consommation en des périodes plus propices.

[REX 14.2] : Le stockage stationnaire n'est pas directement substituable au V2G, car les batteries stationnaires permettent d'étendre le couplage des charges des véhicules électriques au-delà des périodes de production des énergies renouvelables alors que l'amélioration du couplage par le V2G est dépendant du potentiel de flexibilité des charges.

[REX 14.3] : Le stockage stationnaire induit une dépense additionnelle plus importante que le V2G car dans ce dernier cas le coût de la batterie est déjà payé et partagé avec les usages de mobilité.

3. LES OPPORTUNITES REGIONALES DU COUPLAGE.

Selon les données de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement la Région SUD produit 1223 MW d'électricité d'origine photovoltaïque, qui correspondent à 14% de la puissance installée dans le pays. Grâce à sa position géographique, la région a un facteur de charge solaire de 15,6%, l'objectif étant d'atteindre une capacité installée de 8316 MW en 2023. (DREAL PACA, septembre 2019)

L'engagement en matière de production photovoltaïque dans la région est considérable. D'ici à 2023, les installations photovoltaïques devront plus que tripler la production actuelle. Cette stratégie priorise principalement l'installation de panneaux sur les toitures et ombrières de parking.

Sachant que la Région SUD est la troisième région avec le plus d'immatriculations de véhicules électriques et que le schéma régional ambitionne une augmentation de la production solaire, la détermination des opportunités de couplage est un élément important pour la région.

Le scénario de couplage qui semble le plus adapté à la région correspond à un couplage local (figure 54), alimenté par l'énergie solaire produit à travers de panneaux photovoltaïques. À court terme ce type de couplage est plus attractif lorsqu'il est déployé dans les lieux de travail, plus particulièrement dans les parkings des entreprises et les bâtiments tertiaires. Il peut être étendu à des hubs de transport disposant de parkings avec des stationnements longs tels que les aéroports et les gares.

Le choix du lieu de charge correspond au fait que le couplage des EnR avec les véhicules électriques est mieux synchronisé dans les espaces où le véhicule passe la plupart de temps stationné. Ce stationnement, notamment diurne induit une synchronisation spontanée qui permet au véhicule de consommer de l'énergie solaire dans les pics de production solaire. Ce couplage permet d'absorber plus rapidement toute la production photovoltaïque en réduisant les pertes et les coûts pour le réseau.

Ce couplage présente un avantage puisque la production d'énergie solaire est générée entre 7h00 et 21h00 ou entre 8h00 et 18h00 en fonction de la saison. Les véhicules particuliers se garent généralement au parking des entreprises durant cette tranche horaire. Il est donc plus facile de mettre en place un dispositif de flexibilité et de pilotage des charges qui exploite ces temps de disponibilité des véhicules électriques pour optimiser la synchronisation des charges avec la variation du niveau de production des EnR.

De plus, le couplage dans les entreprises réduit la nécessité d'utiliser une batterie stationnaire, car tout excédent de production éventuel peut aussi être absorbé directement par la consommation des installations et des bâtiments présents sur le site, ce qui réduit les pertes et évite un impact sur le réseau.

De surcroît, les entreprises en tant que personnes juridiques ont une plus grande capacité d'investissement et de décision, ce qui peut rendre le processus d'installation de l'infrastructure de charge et de la production d'énergie plus efficace. Dans le court terme, le couplage dans les zones résidentielles peut être soumis à davantage de restrictions, car il doit garantir la disponibilité d'un véhicule pendant la journée pour récupérer l'énergie produite, ou il doit disposer d'un système de stockage permettant d'absorber la production alors que la consommation est généralement faible. Cependant, nous avons vu que même si le prix des batteries diminue, ce stockage reste encore coûteux.

Les opportunités d'un couplage à court terme dans les espaces résidentiels dépendent en grande partie des profils de charge et des configurations territoriales. Ces profils varient en fonction du type de population et des logiques de

déplacements. Si la charge est effectuée dans une large mesure la nuit, il est nécessaire de mobiliser d'autres sources d'énergie, telles que l'énergie éolienne selon les prévisions, ou l'énergie solaire doté d'un système de stockage voire de l'énergie hydraulique. Au contraire, si la recharge dans les zones résidentielles peut s'effectuer pendant la journée, nous nous adressons à une population présentant des caractéristiques différentes, par exemple une population de retraités ou des familles urbaines ayant plusieurs véhicules ou bénéficiant d'une offre de transport en commun qui induit un stationnement diurne des véhicules.

Les opportunités de couplage à court terme pour la région dépendent aussi de certaines conditions techniques pour garantir l'efficacité du système. Le déploiement de dispositifs de recharge intelligente est nécessaire pour améliorer la synchronisation de la production et de la consommation, en permettant de faire appel à des charges flexibles selon les besoins de couplage.

Le couplage dans un environnement professionnel permet aussi d'augmenter l'autoconsommation du bâtiment grâce à la mobilisation de systèmes de management de l'énergie sur les sites. Les systèmes de recharge intelligents nécessitent un échange d'informations continu pour synchroniser la production en fonction des besoins du véhicule et affecter toute surproduction éventuelle à d'autres sources de consommation présentes sur le site. La flotte de véhicules personnels dans les entreprises semble offrir des conditions de disponibilité des véhicules et des données pour mettre en place des dispositifs de flexibilité avancé et de mobilité partagée. Ceci permet d'envisager plusieurs modèles économiques en fonction des configurations des sites et du nombre d'entreprises intéressées.

À long terme, la logique de couplage est différente car il faut tenir compte d'une plus forte adoption de véhicules électriques sur le marché. Plus la production d'EnR et le nombre de véhicules électriques sont élevés, plus la synchronisation sera spontanée et plus le volant de flexibilité sera potentiellement plus important ce qui fera significativement augmenter la proportion des énergies renouvelables dans les charges des véhicules électriques.

La recharge intelligente sera cruciale pour améliorer cette synchronisation en mobilisant diverses flexibilités et elle permettra également de limiter l'impact du développement des véhicules électriques sur les réseaux locaux.

L'infrastructure de chargement devra être compatible avec plusieurs types de recharge, de sorte qu'il sera possible d'offrir une charge lente pour des utilisateurs flexibles ayant un temps de stationnement long et une recharge rapide pour des utilisateurs peu flexibles ayant un temps de stationnement plus court. L'offre de services de flexibilité sera plus complexe et nécessitera une stratégie commerciale adaptée pour rendre les services plus attrayants et simples pour les utilisateurs en développant des interfaces fluides, des forfaits et des incitations tarifaires à la flexibilité.

Dans cette perspective longue, le V2G devient une technologie plus attractive qui permettra de fournir un service au réseau, agissant en tant que catalyseur des énergies renouvelables mais également en tant que source de stockage pour apporter un support au réseau durant les heures de pointe de consommation. La technologie V2G n'est pas assez mature pour l'instant, cependant elle représente une grande opportunité pour augmenter la valeur du couplage, car cette technologie constituera une excellente source de stockage pilotable, réduisant l'impact de l'EnR sur le réseau et permettant de nombreuses valorisations des EnR ainsi couplées par des services innovants.

Les opportunités de couplage à long terme conduisent plutôt à l'exploitation de la technologie V2G dans les zones résidentielles. Face à une insertion massive des EnR, il semble nécessaire de pouvoir activer le couplage dans tous les lieux où les véhicules

électriques seront stationnés afin d'absorber les éventuelles productions excédentaires. L'exploitation du V2G permettra ainsi d'augmenter le potentiel de flexibilité des véhicules branchés en modulant la capacité de charge et de décharge selon les besoins du réseau en la rendant indépendante des contraintes de mobilité. Au-delà de ces services, le V2G peut aussi générer des avantages pour les ménages qui consomment principalement en fin de journée et pendant la nuit en permettant une réinjection de l'électricité dans l'habitat durant ces périodes (V2H).

L'augmentation du nombre de véhicules électriques nécessitera une plus grande puissance pour supporter les charges. L'augmentation des énergies renouvelables peut répondre à ce besoin, mais générera un impact sur les réseaux locaux pour supporter l'augmentation de la capacité. Le système de couplage optimal dans un scénario de massification à long terme, accordant la priorité à la production photovoltaïque en fonction de la stratégie de la région, consiste en un couplage local dans les lieux de travail, les maisons ou les espaces publics, en encourageant la technologie de V2G pour la consommation des ménages, afin de limiter les coûts de renforcement des réseaux.

Pour conclure, au niveau territorial nous constatons que la région a un grand potentiel pour développer les opportunités de couplage en raison de ses conditions géographiques. Il existe aussi une corrélation entre la production solaire et la concentration de la population principalement dans le département de Bouches-du-Rhône.

Ainsi les déplacements quotidiens pourraient sans doute être largement satisfaits par de la mobilité électrique. Cependant, il existe encore différents obstacles techniques et socio-économiques qui rendent ce déploiement difficile. La massification du véhicule électrique et l'augmentation des énergies renouvelables dépendent en grande partie de l'engagement d'acteurs publics et privés. Il est donc nécessaire de promouvoir le véhicule électrique sous différents angles : augmenter l'offre de véhicules des producteurs, améliorer l'infrastructure de charge des opérateurs de bornes, sensibiliser le public à la transition énergétique et à l'importance du véhicule électrique pour l'avenir à travers du secteur public.

CONCLUSION

La synchronisation de la charge des véhicules électriques avec la production d'EnR nécessite une recharge intelligente pour pouvoir augmenter la part d'EnR consommée par le véhicule, qui permet simultanément de réduire l'impact environnemental de la production d'énergie issue de sources polluantes. Ce système de recharge intelligent comprend une communication et un pilotage pour adapter la production d'énergie en temps réel à la flexibilité de la recharge du véhicule.

Les conditions techniques de ce pilotage sont complexes car les objectifs poursuivis peuvent être multiples. Toutefois un certain nombre d'enseignements ont été dégagés.

Est-il pertinent de coupler les énergies renouvelables et la recharge du véhicule électrique ?

[REX1.1] : Il est pertinent de favoriser le couplage de la charge des VE avec la production d'EnR car le couplage favorise une diminution des émissions de CO2 durant la phase d'usage des VE et cette diminution est d'autant plus forte que le mix énergétique est à base d'EnR.

[REX1.2] : Il y a une synergie dans le couplage qui permet de trouver une demande à la production d'EnR et de rendre attractif l'usage du VE.

[REX1.3] : L'intérêt du couplage est fortement dépendant de la couverture géographique de l'infrastructure de charge, du déploiement du Smart Charging ainsi que du V2G.

Quelles sont les habitudes/profils types de charge des VE ?

[REX 2.1] : Les profils de charge varient en fonction du lieu de charge et des conditions socio-économiques.

[REX 2.2] : Les profils de charge sont différents selon le territoire et les besoins de mobilité des utilisateurs.

[REX 2.3] : L'analyse des profils de charge sectorisés et stratifiés en fonction des considérations de voisinage permet de comprendre le comportement de charge des utilisateurs et d'identifier les mailles du réseau favorables au couplage.

[REX 2.4] : La construction de profils de charge permet d'identifier le potentiel de la synchronisation de la production avec les besoins en charge et d'améliorer les performances de couplage.

Le fait que les charges se fassent dans un lieu privé ou public modifie-t-il les opportunités de couplage ?

[REX 3.1] : Le comportement des utilisateurs varie en fonction des points de charge publics ou privés, et des lieux des espaces résidentiels ou de travail.

[REX 3.2] : La flexibilité de charge est différente dans un espace public ou privé car le stationnement a une durée et correspond à un besoin différent. Les stationnements dans les espaces publics ouverts sont généralement plus courts que dans les espaces privés ou les espaces fermés.

La micro et macro-mobilité sont-elles déterminantes pour le couplage des EnR et VE ?

[REX 4.1] : Le véhicule électrique en location ou en autopartage peut être intégré au système de transport en commun dans les endroits où le transport en commun n'est pas accessible.

[REX 4.2] : Le véhicule électrique répond de manière appropriée aux trajets courts et couvre les micro-déplacements en réduisant de manière optimale l'impact des véhicules thermiques sur l'environnement.

[REX 4.3] : L'intégration du véhicule électrique dans la micro-mobilité et la mobilité peut être favorable dans les villes où le système de transport en commun est robuste et répond largement aux besoins des utilisateurs.

[REX 4.4] : L'intégration du véhicule électrique doit être accompagnée de politiques publiques qui stimulent à un niveau tarifaire l'utilisation du véhicule dans la chaîne de transport public.

[REX 4.5] : Le couplage s'adapte bien à des logiques de micro-mobilité du fait des besoins plus limités en charge.

Pour améliorer le coulage des charges et de la production EnR, faut-il promouvoir un type d'électromobilité individuelle ou collective et sous quel type d'usage partagé ou individuelle ?

[REX 5.1] : La mobilité partagée crée un modèle économique favorable pour le véhicule électrique, lui permettant de réduire son impact environnemental.

[REX 5.2] : La mobilité partagée permet d'amortir rapidement la valeur du véhicule électrique en raison de l'utilisation accrue du véhicule par différents utilisateurs et le partage des coûts entre les différents acteurs.

[REX 5.3] : L'outil de gestion de la mobilité individuelle est un élément important de l'optimisation de l'utilisation des véhicules électriques et de la mobilisation des EnR pour les charges durant les périodes de stationnement.

[REX 5.4] : Les flottes de véhicules d'entreprises se prêtent plus facilement à un pilotage, à une optimisation des déplacements et des charges par l'intégration d'un système de mobilité au système d'information des entreprises. Dans le cas d'une mobilité individuelle à grande échelle, la synchronisation et l'optimisation en fonction du lieu de charge devient plus complexe.

[REX 5.5] : Sans système de stockage stationnaire, il existe un arbitrage entre l'optimisation de la disponibilité de la flotte et le couplage local, notamment avec l'électricité d'origine photovoltaïque.

Les productions d'EnR peuvent-elles couvrir les besoins de charges des VE et sous quelles conditions ?

[REX 6.1] : Pour couvrir 100% des besoins du véhicule en énergie renouvelable, une capacité de production importante est requise en fonction du nombre de véhicules à recharger, de l'intermittence et des trajectoires de mobilité.

[REX 6.2] : Du fait des contraintes de production d'énergie renouvelable et de mobilité le couplage réalisé ne couvre pas à 100% la recharge du véhicule et une partie de la production d'EnR est consommée localement par les bâtiments.

[REX 6.3] : Le manque de capacité EnR en local nécessite une connexion aux réseaux de distribution habituels pour satisfaire les besoins des sites. Le couplage nécessite des flexibilités et des investissements qui sont difficilement réalisables en local selon les configurations d'usages.

Est-il préférable d'avoir un couplage local ou non local ?

[REX 7.1] : L'utilisation de production d'EnR locale pour la charge des véhicules réduit les pertes dues au transport d'énergie.

[REX 7.2] : Les systèmes de production d'EnR locaux peuvent être plus rentables grâce à l'autoconsommation et à l'introduction de la cogénération principalement pour satisfaire des consommations non-contrôlables telles que celles des maisons individuelles.

[REX 7.3] : L'introduction du véhicule électrique augmente la part des énergies renouvelables dans l'autoconsommation du fait d'un couplage effectif. Le pilotage des charges augmente cette part.

[REX 7.4] : L'opportunité d'un couplage local des charges avec la production d'EnR dépend des conditions géographiques du lieu de charge et des potentiels de production disponibles durant les périodes de charge.

Synchroniser les charges avec la disponibilité d'EnR favorise-t'il systématiquement l'impact sur l'environnement ?

[REX 8.1] : Le dispositif de pilotage des charges est un élément important qui détermine la part d'EnR consommée par le véhicule et réduit donc son impact sur l'environnement.

[REX 8.2] : Le Smart Charging ne conduit pas nécessairement à un couplage optimal des charges avec la production d'EnR. Il est nécessaire d'intégrer des modèles flexibles d'optimisation pour assurer une plus grande disponibilité des charges durant les périodes de production d'EnR variables afin de limiter les surproductions et de réduire la part des charges s'effectuant lors des pics de demande.

[REX 8.3] : Pour que le couplage local soit plus vertueux une source de consommation d'énergie quasi constante ou un grand nombre de véhicules électriques sont nécessaires afin de faciliter la mise en œuvre des flexibilités. Sans modalités de stockage, un couplage sur une maille plus étendue apparaît plus facilement réalisable et plus vertueux.

Quel est le modèle ou le mécanisme de flexibilisation le plus adapté pour promouvoir le couplage ?

[REX 9.1] : La prise en compte du comportement des utilisateurs permet de proposer des options de flexibilité adaptables aux besoins de chacun.

[REX 9.2] : Un menu d'options semble préférable à une seule option. Proposer une échelle de flexibilité permet de révéler les préférences des personnes pour adopter un comportement de charge, ce qui précise l'estimation des besoins de charge à un moment donné.

[REX 9.3] : Les incitations financières à la flexibilité sont un élément important pour engager les utilisateurs dans des changements de comportement. La valorisation environnementale des comportements et par conséquent les potentialités de couplage des charges avec les EnR sont des éléments complémentaires qui augmentent l'offre de flexibilité de la part des usagers.

[REX 9.4] : La simplicité des options et les facilités d'apprentissage des stratégies de charge est un élément primordial de l'engagement à long terme dans des dispositifs de flexibilité et de couplage.

La flexibilité de la charge est-elle nécessaire pour optimiser le couplage des énergies renouvelables et la recharge des véhicules électriques ?

[REX 10.1] : La flexibilité de recharge et la recharge intelligente permet d'augmenter la quantité d'énergie renouvelable dans le véhicule électrique et améliore la performance du couplage des charges avec les EnR.

[REX 10.2] : La présence d'un stockage stationnaire permet d'atténuer les problèmes d'intermittence de la production d'énergie renouvelable et favorise le couplage au-delà des périodes de production des EnR.

[REX 10.3] : La prévision la plus précise possible des durées de stationnement des véhicules est essentielle pour optimiser le couplage. Ainsi les contextes professionnels où les mobilités et les horaires sont prévisibles ou déclarés dans des systèmes d'information fournissent des données précieuses pour élaborer des algorithmes performants et faciles d'utilisation.

Pour garantir le couplage ENR et VE, une centrale virtuelle est-elle nécessaire ?

[REX 11.1] : L'utilisation de centrales virtuelles n'est pas indispensable pour le couplage des énergies renouvelables et la recharge du véhicule.

[REX 11.2] : La centrale virtuelle est encore en phase de maturation et l'introduction d'un système de cette ampleur implique un investissement important qui pèse sur la rentabilité de projets de couplage au niveau local.

[REX 11.3] : Les centrales virtuelles répondent mieux à l'agrégation de sources renouvelables diversifiées et nombreuses sur des périmètres géographiques plus larges. Elles semblent plus efficaces pour optimiser le potentiel d'un couplage non local.

Est-il nécessaire d'avoir un système de stockage d'énergie pour augmenter la partie de renouvelables utilisée pour la recharge de VE ?

[REX 12.1] : L'utilisation de batteries fixes améliore le couplage et augmente la part d'énergie renouvelable dans le véhicule, mais son utilisation augmente les coûts du système énergétique.

[REX 12.2] : L'utilisation de batteries peut être limitée dans une situation locale d'autoconsommation de l'énergie produite afin d'éviter les pertes d'énergie.

[REX 12.3] : Selon le développement des productions d'EnR et du parc de véhicule électrique, les opportunités de couplage peuvent se résoudre par un développement du Smart Charging.

[REX 12.4] : Le stockage apparaît comme intéressant qu'en présence d'une forte production excédentaire ne pouvant être absorbée par des charges ou plus généralement par une demande s'exprimant à une maille supérieure du réseau. Dans ce cas les coûts de transport, de renforcement ou d'écêtement nécessaires pour traiter ces situations de forte production excédentaire doivent être arbitrés avec les coûts d'investissement dans le stockage.

Les charges changent-elles avec la taille des batteries ? Cela a-t-il une influence sur les opportunités de couplage ?

[REX 13.1] : Des batteries de plus grande capacité diminue la fréquence de charge des véhicules, et augmente la durée de charges.

[REX 13.2] : Plus la taille de la batterie est grande, plus la puissance nécessaire pour répondre à ses besoins de charge est grande. Dans une perspective de couplage cela nécessite une augmentation de la capacité des énergies renouvelables installées.

[REX 13.3] : L'augmentation de la capacité des batteries correspond à une demande d'autonomie des utilisateurs qui est majoritairement déterminée dans un environnement où la couverture du réseau de recharge est faible, mais n'est pas forcément liée à des besoins de mobilité quotidiens.

Est-ce que l'implémentation du V2G change les opportunités de d'utilisation d'une batterie de stockage stationnaire, favorise l'équilibre entre la production d'énergie et la recharge du véhicule ?

[REX 14.1] : Le lieu de charge détermine la plupart des variables impliquées dans le couplage. La présence du V2G permet de valoriser le temps de connexion des véhicules électriques par des services réseau ou un transfert d'électricité d'origine renouvelables vers d'autres lieux de consommation en des périodes plus propices.

[REX 14.2] : Le stockage stationnaire n'est pas directement substituable au V2G, car les batteries stationnaires permettent d'étendre le couplage des charges des véhicules électriques au-delà des périodes de production des énergies renouvelables alors que l'amélioration du couplage par le V2G est dépendant du potentiel de flexibilité des charges.

[REX 14.3] : Le stockage stationnaire induit une dépense additionnelle plus importante que le V2G car dans ce dernier cas le coût de la batterie est déjà payé et partagé avec les usages de mobilité.

Le couplage des énergies renouvelables et la recharge du véhicule électrique associe différents facteurs techniques, sociaux et économiques. Bien qu'il n'existe pas un business model encore bien défini, différentes pratiques permettent d'approcher un modèle de couplage approprié en fonction de caractéristiques territoriales de la région. Les opportunités de couplage des énergies renouvelables et de la recharge des véhicules électriques dépendent fortement des conditions géographiques, techniques, économiques et sociales des territoires. Toutefois les projets étudiés fournissent des éléments essentiels pour comprendre la démarche, ainsi que pour comprendre les barrières, les défis et les bonnes pratiques. Grâce à l'analyse des projets, il a été possible d'établir 4 modalités de couplage différent. Dans ces modalités de couplage, celles réalisées sur un lieu de travail ou un parking de gare ou d'aérogare à court terme et celles effectuées au lieu d'habitat à plus long terme représentent des enjeux forts pour la région.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME**, 09/04/2018 Chiffres clés, <https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>
- ADEME**, 2018, Le baromètre 2018 des énergies renouvelables électriques en France
- ADEME**, 2018, L'autoconsommation d'électricité d'origine photovoltaïque.
- ADEME**, 2016, Le solaire photovoltaïque, https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/avis_ademe_solairepv_201602.pdf
- Ávila, Francisco, Agamez Arias, Anny**, 2012, La infraestructura de movilidad y su relación con el desarrollo económico y la competitividad: Revisión conceptual, Panorama Económico, pg 147-168.
- AVERE**, 2019, Suivez la progression du marché du véhicule électrique ! http://www.averre-france.org/Site/Article/?article_id=6562&from_espace_adherent=0
- Automobile-propre**, 2018, Voiture électrique : avantages et inconvénients <https://www.automobile-propre.com/dossiers/voiture-electrique-avantages-et-inconvenients/>
- Automobile-propre**, 2019, Chiffres de vente & immatriculations de voitures électriques en France, <https://www.automobile-propre.com/dossiers/chiffres-vente-immatriculations-france/>
- Allemand, François Ascher, J. Levy**, 2005, Les sens du mouvement. Modernité et mobilités dans les sociétés urbaines contemporaines.
- Automobile-propre**, 2017, Les véhicules électriques toujours dépendants des aides publiques, <https://www.automobile-propre.com/vehicules-electriques-toujours-dependants-aides-publiques/>
- Amjada. Muhammad, Ayaz Ahmadb, Mubashir Husain Rehmanic, Tariq Umerd**, 2018, A review of EVs charging: From the perspective of energy optimization, optimization approaches, and charging techniques, p 386-417
- Angot Laureline**, 2014, La mobilité électrique dans les systèmes de transport et de mobilité urbains : constats et perspectives. Comment développer une nouvelle offre de mobilité durable par le biais de l'électromobilité dans la métropole toulousaine?
- Atiane Energy, Hewlett Packard, ORECA**, 2014, Etude relative à l'impact du véhicule électrique et de la production photovoltaïque sur les réseaux de distribution d'électricité, Etude du cas Provence Alpes- Côte d'Azur
- Bloomberg New Energy Finance**, 2017, Lithium-ion Battery Costs and Market <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2017/07/BNEF-Lithium-ion-battery-costs-and-market.pdf>
- CRE**, 2018, Document de réflexion et de proposition, Les réseaux électriques au service des véhicules électriques
- CRE**, août 2019, L'intégration des EnR : un défi pour les gestionnaires de réseaux, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=integrationenr-defi-gestionnaires-reseaux>
- CRE**, août 2019, Les étapes de l'intégration des EnR aux réseaux électriques, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=etapes-integration-enr>
- CRE**, août 2019, L'importance de la flexibilité de la demande pour la gestion du système électrique, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=flexibilite-demande-systeme-electrique>
- CRE**, 2018, Autoconsommation, <https://www.cre.fr/Transition-energetique-et-innovation-technologique/Autoconsommation>
- CRE**, août 2019, Ce qu'il faut savoir pour comprendre l'autoconsommation, <http://autoconsommation.cre.fr/ce-qu-il-faut-savoir.html>

CIE AUTOMOTIVE, 2017, Evolution in the Automotive sector, https://www.cieautomotive.com/documents/125060/491803/Ingenier%C3%ADa+Analyst+Day_reduced.pdf/d7c52ce6-c2f0-4501-8654-7c14b0fc3ece

CRE, août 2019, Comprendre les Smart grids, <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=comprendre-les-smart-grids>

Commission européenne, août 2019, Cadre pour le climat et l'énergie à l'horizon 2030, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr

Colmenar, Antonio -Santosa, Antonio-Miguel Muñoz-Gomez, Enrique Rosales-Asensiob, Africa Lopez-Rey, 2019, Electric vehicle charging strategy to support renewable energy sources in Europe 2050 low-carbon scenario p 61-74

Codani, Paul, Pierre-Louis Le Portz, Pierre Claverie, Marc Petit, Yannick Perez, 2017 Coupling local renewable energy production with electric vehicle charging: a survey of the French case.

DREAL PACA, septembre 2019, Le solaire photovoltaïque, <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/le-solaire-photovoltaïque-r1609.html>

DREAL PACA, 2019, Cadre régional pour le développement des projets photovoltaïques en Provence-Alpes-Côte d'Azur, http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plaquette_cadre_regional_pv_dreal_paca_web.pdf

Daina. Nicolò, Aruna Sivakumar, John W. Polak, 2017, Electric vehicle charging choices: Modelling and implications for smart charging services, p 36-56

Matthieu Dubarry, Arnaud Devie, Katherine McKenzie, 2017, Durability and reliability of electric vehicle batteries under electric utility grid operations: Bidirectional charging impact analysis, p39-49

Ecole des Ponts, ParisTech, Groupe Renault, 2017, MOOC Mobilités et véhicules électriques,

France stratégie, Dominique Auverlot, Nicolas Meilhan, Bérengère Mesqui et Aude Pommeret, 2018, Les politiques publiques en faveur des véhicules à très faibles émissions

Fernández Yolanda, Olmedillas Blanca, 2002, Transporte externalidades y coste social, p 45-67

Gutiérrez, Andrea, 2010, Movilidad, transporte y acceso: una renovación aplicada al ordenamiento territorial, <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-331/sn-331-86.htm>.

Geoportail.gouv.fr, 2010, Potentiel solaire en PACA (rayonnement direct), <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/potentiel-solaire-en-paca-rayonnement-direct>

Haddadian, Ghazale, Mohammad Khodayar, Mohammad Shahidehpour, 2015, Accelerating the Global Adoption of Electric Vehicles: Barriers and Drivers.

Hungerford. Zoe, Anna Bruce, and Iain MacGill, 2019, The Value of Flexible Load in Power Systems with High Renewable Energy Penetration

Habib. Salman, Muhammad Kamran, Umar Rashid, 2015, Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks e A review, p 205-214

INSEE, 2017 Aller travailler en vélo est peu fréquent en Provence-Alpes-Côte d'Azur, https://insee.fr/fr/statistiques/2553852#graphique-Figure_2

INSEE, 2017, Provence-Alpes-Côte d'Azur - Forte concentration de la population dans les principales communes, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2540580>

INSEE, 2019, Sept salariés sur dix vont travailler en voiture, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3714237>

Jin, C, X. Sheng and P. Ghosh, "Optimized Electric Vehicle Charging With Intermittent Renewable Energy Sources," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 6, pp. 1063-1072, Dec. 2014.

JRC, Vincenzo Punzo, 2014, Transport and traffic models for studying electric mobility

J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida, 2019, Using Vehicle-to-Grid to Maximize the Integration of Intermittent Renewable Energy Resources in Islanded Electric Grids

Jiana. Liu, Zhao Yongqianga, Kim Hyoungmib Keinera, Dominik, Manish Ramb, Larissa De Souza Noel Simas Barbosac, Dmitrii Bogdanovb, 2018, The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai, p 206-214

Breyer. Christian, 2019, Cost optimal self-consumption of PV prosumers with stationary batteries, heat pumps, thermal energy storage and electric vehicles across the world up to 2050, p 406–423

Longo Michela, Federica Foiadelli and Wahiba Yaïci, 2018, Electric Vehicles Integrated with Renewable Energy Sources for Sustainable Mobility

L’observatoire Cetelem, 2019, Le mystère de la voiture électrique, <http://observatoirecetelem.com/wp-content/themes/obs-cetelem>
V3/publications/2019/OBSERVATOIRE_AUTO_2019_MD.pdf

Luthander. Rasmus, Joakim Widén a, Daniel Nilsson b, Jenny Palm, 2015, Photovoltaic self-consumption in buildings: A review, p 80-94

Mougenot Benoît, 2015, Automobile et nouveaux modèles économiques de la mobilité électrique, au cœur d'une diversité institutionnelle, p. 71-88, <https://www.cairn.info/revue-innovations-2015-1-page-71.htm>

Ministère de la transition écologique et solidaire, 2017, Autopartage en France, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/autopartage-en-france>

Ministère de l’écologie, du développement durable et de l’énergie, 2014, Rapport sur l’autoconsommation et l’autoproduction de l’électricité renouvelable.

Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016, Loi de transition énergétique pour la croissance verte, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte>

Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016, Systèmes d’autoconsommation, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/systemes-dautoconsommation>

Morganti, Eleonora, Michael Browne, 2018, Technical and operational obstacles to the adoption of electric vans in France and the UK: An operator perspective, pg 90-97

Mitropoulos, Lambros K., Panos D. Prevedouros, Pantelis Kopelias (2017) « Total cost of ownership and externalities of conventional, hybrid and electric vehicle pg. 267-274.

Munkhammar, Joakim, Pia Grahn, Joakim Widen, 2013 Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging, P 208-216

Mwasilu. Francis, Jackson John Justo, Eun-Kyung Kim, Ton Duc Do, Jin-WooJung, 2014, Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration, p 501-516

Noel, Lance, Gerardo Zarazua de Rubensa, Benjamin K. Sovacoola, Johannes Kester, 2019 Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety, pg 96-107

Noel, Lance, Gerardo Zarazua de Rubensa, Johannes Kester, Benjamin K. Sovacoola, 2018, Beyond emissions and economics: Rethinking the co-benefits of electric vehicles (EVs) and vehicle-to-grid (V2G), p 130-137

Noel, Lance Gerardo Zarazua de Rubensa, Johannes Kester, Benjamin K. Sovacoola, 2019, Navigating expert skepticism and consumer distrust: Rethinking the barriers to vehicle-to-grid (V2G) in the Nordic region, p 67-77

Onata, Nuri Cihat, Murat Kucukvarb, Nour N.M. Aboushaqraha, Rateb Jabbara, 2019, How sustainable is electric mobility? A comprehensive sustainability assessment approach for the case of Qatar, pg, 461-477

Observatoire des territoires, 2011, Carte des zones d'emploi 2010, https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/observatoire-des-territoires/sites/default/files/Carte_ZE_2010.pdf

Peillon Sophie, 2017, Les systèmes produit-service conduisent-ils à des business models plus durables ? <https://www.strategie-aims.com/events/conferences/28-xxvieme-conference-de-l-aims/communications/4706-les-systemes-produit-service-conduisent-ils-a-des-business-models-plus-durables/download>

Pournaras. Evangelos, Seoho Jung, Srivatsan Yadhunathan, Huiting Zhang, Xingliang Fang, 2019 Socio-technical smart grid optimization via decentralized charge control of electric vehicles.

Philipsen. Ralf, Teresa Brell, Waldemar Brost, Teresa Eickels, Martina Ziefle, 2018, Running on empty – Users' charging behavior of electric vehicles versus traditional refueling, p 475-492

RTBF, 2019, Déplacements : l'avenir est dans la micro-mobilité, https://www.rtbf.be/lapremiere/article/detail_deplacements-l-avenir-est-dans-la-micro-mobilite?id=9816018

RTE, 2019 Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, https://www.rte-france.com/sites/default/files/electromobilite_synthese_9.pdf

RTE, 2017, Le taux de pertes en 2017 est stable, <https://bilan-electrique-2017.rte-france.com/reseau-de-transport/63-le-taux-de-pertes/#>

RTE, Juillet 2019, Production d'électricité par filière, <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-mix-energetique>

RTE, Juillet 2019, Consommation d'électricité, <https://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-consommation>

Service-publicque.fr, 2019, Installation d'une éolienne domestique ou agricole, <https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F33368>

SIGMA TEC, Bornes de recharge pour véhicules électriques, <http://www.sigma-tec.fr/elec/informations-techniques-calculs-bornes-recharge-vehicule-electrique.html>

Service-publicque.fr, 2019 Bonus écologique pour un véhicule électrique (voiture, scooter, moto, vélo, ...), <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F34014>

Saboori. H, M. Mohammadi, R. Taghe, 2011, Virtual Power Plant (VPP), Definition, Concept, Components and Types

Thompson, Griffin, Morgan Bazilian, 2013, Democratization, Energy Poverty, and the Pursuit of Symmetry

Tulpule. Pinak J, Vincenzo Marano, Stephen Yurkovich, Giorgio Rizzoni, 2013, Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station, p 323-332

U.S. Department of Energy, 2004, Energy Use, Loss and Opportunities Analysis: U.S. Manufacturing & Mining.

Visser Lennard, 2017, Towards emission free traffic in Amsterdam, An assessment of electric vehicle charging with renewable energy.

Venugopal Prasanth, Aditya Shekhar, Erwin Visser, Natalia Scheele, Gautham Ram Chandra Mouli, Pavol Bauer, Sacha Silvester, 2018, Roadway to self-healing highways with integrated wireless electric vehicle charging and sustainable energy harvesting technologies, pg 1226-1239

Weldon Peter, Patrick Morrissey, Margaret O'Mahony, 2018, Long-term cost of ownership comparative analysis between electric vehicles and internal combustion engine vehicles.

Will. Christian, Alexander Schuller, 2016, Understanding user acceptance factors of electric vehicle smar charging, p 198-214

Zhen-Yu Shea, Qing Suna, Jia-Jun Maa, Bai-Chen Xiea, 2017, What are the barriers to widespread adoption of battery electric vehicles? A survey of public perception in Tianjin, China, pg 29-40

Zhenga. Yanchong, Songyan Niua, Yitong Shanga, Ziyun Shaoc, Linni Jiana, 2019, Integrating plug-in electric vehicles into power grids: A comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation, p 424-439

Les fabriques de la Connaissance

Le Partenariat entre la Région et les Etablissements d'Enseignement Supérieur et de Recherche

La région dispose d'un socle de recherche et de formation en sciences humaines et sociales solides et de qualité susceptible d'alimenter la réflexion des différents acteurs de la région, de contribuer à la mise en débat de ses problématiques socio-économiques et de constituer une aide à la décision publique.

Convaincu que la présence de ces formations et laboratoires en sciences humaines et sociales constitue un important potentiel de connaissance du territoire régional, la Région a souhaité mobiliser ce milieu d'expertise au service des politiques régionales pour promouvoir un développement régional fondé sur l'innovation la formation de haut niveau et l'interdisciplinarité des savoirs.

C'est l'objet du partenariat des « Fabriques de la connaissance » que la Région met en œuvre depuis 2015 avec les cinq Universités de la Région et Sciences Po Aix.

Mentions de droit

Ce rapport est publié sous licence Creative Commons CC BY-NC-SA

(Attribution - Pas d'utilisation commerciale - Partage dans les mêmes conditions)

