

Programme : Smart Territories
Projet : Modélisation Interopérabilité Coopération

Les véhicules électriques au service
du système électrique en 2050 ?

REVISIONS			
Version	Auteurs	Date	Commentaires
1	alice.chiche@artelys.com pierre.attard@artelys.com olivier.thoni@artelys.com pierre.nicolas@renault.com frederic.novel-cattin@renault.com lionel.scremin@irt-systemx.fr	30 nov. 2016	1 ^{ère} version pour publication
2	lionel.scremin@irt-systemx.fr	2 janv. 2017	Ajout des références Previmer

Avant-Propos

Basé sur le plateau de Paris-Saclay, **l'Institut de Recherche Technologique SystemX** se positionne comme un accélérateur de la transformation numérique. Centrés sur l'ingénierie numérique des systèmes du futur, ses projets de recherche couvrent les enjeux scientifiques et technologiques des filières industrielles transport et mobilité, énergie, sécurité numérique et communications. Ils répondent aux défis que rencontrent les industriels dans les phases de conception, de modélisation, de simulation et d'expérimentation des produits et services futurs, intégrant de plus en plus de technologies numériques.

Le projet MIC (Modélisation, Interopérabilité, Coopération) regroupe 11 partenaires industriels et académiques. Lancé en juin 2013 pour une durée de 42 mois, il porte une double ambition : concevoir des outils de modélisation et de simulation permettant d'optimiser et de superviser les réseaux de transport multimodaux (temps de transport, coût, consommation énergétique, accessibilité) ; et développer des modèles de systèmes gérant les véhicules et les infrastructures de transport pour améliorer les performances globales des réseaux.

L'étude **Véhicule Electrique 2050** ici présentée, est un livrable du projet MIC au sein de l'activité d'analyse de l'électromobilité dans la perspective d'une production électrique à fort taux renouvelable à l'horizon 2050. Il s'agit d'évaluer l'opportunité de considérer le transport comme un possible levier de flexibilité du système électrique, et non seulement un consommateur d'énergie.

Synthèse

Dans le contexte actuel d'expansion du marché des véhicules électriques, se pose la question de **l'impact sur le système électrique de l'électrification d'une partie de l'usage transport**. En particulier en France, la consommation électrique est caractérisée par une pointe hivernale en début de soirée, qui pourrait se voir accentuée par la recharge de véhicules électriques à la même heure. Néanmoins, de plus en plus d'études¹ illustrent un **contournement possible** de cette difficulté par un **mode de gestion intelligent**² de la **charge des batteries**. En outre, sans nécessairement représenter une contrainte, **les batteries des véhicules électriques** sont aujourd'hui envisagées comme un **levier supplémentaire de flexibilité** pour le système, puisqu'elles pourraient être utilisées comme **stockages**.

L'objet de la présente étude est ainsi d'**évaluer le gain relatif au service de stockage que rendraient les batteries des véhicules électriques**, et ce en particulier dans le cadre d'un **mix fortement renouvelable**, pour lequel la flexibilité a d'autant plus de valeur qu'il ne dispose pas de moyens thermiques pilotables. Pour cela, on s'appuie sur les **modèles et données** pointus de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016), dont on affine les hypothèses inhérentes au transport. On effectue ainsi une optimisation des capacités de production et de stockage électrique à l'horizon 2050 sur l'ensemble des régions françaises, en assurant simultanément une **gestion optimisée de l'équilibre offre-demande électrique en chaque heure d'une année**. La gestion optimisée de cet équilibre dépend notamment de la **prise en compte de la dynamique des stockages et du pilotage de certains usages électriques**, et ainsi des injections et soutirages des batteries des véhicules sur le système électrique.

L'étude compare en particulier **deux situations** ; la première correspond au cas central de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016)³ ; la seconde en diffère par **la possibilité d'utiliser les batteries des véhicules comme stockages électriques**. L'objectif de cette démarche est ainsi d'identifier les impacts de ce service sur un système électrique français 100% EnR, et de **chiffrer le potentiel de création de valeur** absolue associée⁴.

Les principaux enseignements de l'étude sont les suivants :

- | **Les batteries des véhicules se substituent à l'intégralité des stockages électriques infra-journaliers**⁵ puisqu'elles en possèdent des caractéristiques similaires.
- | **Les batteries des véhicules ne remplacent pas le stockage inter-saisonnier**, nécessaire dans le cadre d'un mix 100% renouvelable pour passer les périodes les plus

¹ (RTE, 2014), (ADEME, Artelys, ATEE, ENEA Consulting, 2013).

² Qu'il s'agisse d'un pilotage statique en fonction d'heures pleines et creuses prédéfinies, comme c'est déjà le cas aujourd'hui pour l'eau chaude sanitaire, ou bien d'un pilotage dynamique intelligent.

³ Dont les hypothèses relatives aux véhicules électriques ont été affinées.

⁴ Les surcoûts pour le système de rendre les chargeurs réversibles et permettant aux batteries d'assurer un service de stockage/déstockage, ainsi que ceux relatifs à une augmentation potentielle du nombre de bornes de charge en lien avec ce service, n'ont en effet pas été évalués.

⁵ Il s'agit de stockages qui se vident en quelques heures lorsqu'ils sont sollicités à puissance maximum ; ils sont qualifiés de « infra-journaliers » car leur utilisation typique est de stocker aux heures les plus favorables de la journée (correspondant dans le cadre 100% renouvelable aux heures d'ensoleillement maximal, là où la demande est en-deçà de la production renouvelable) pour déstocker aux heures de pointe du début de soirée notamment.

critiques, à savoir plusieurs jours consécutifs froids avec un vent faible⁶. En effet, lors de telles périodes, les stockages n'ont pas l'opportunité de se remplir, et de grands volumes d'énergie - au-delà des volumes stockables par les batteries des véhicules - sont nécessaires pour satisfaire la demande.

- | **L'utilisation d'une fraction de chaque batterie des véhicules comme stockage électrique facilite l'intégration de la production photovoltaïque.** Cette production est en effet répartie de manière plus homogène sur la journée, puisque son surplus de production aux heures méridiennes peut être translaté par les stockages sur d'autres heures non ensoleillées.
- | **L'utilisation d'une fraction de chaque batterie des véhicules comme stockage électrique permet d'éviter l'installation d'une partie des éoliennes** et ainsi libérer 400 km² de surface au sol. En effet une partie de la production éolienne peut être substituée à de la production photovoltaïque, dont les batteries aident à l'intégration.
- | En exploitant partiellement les batteries des véhicules comme stockages pour son propre usage, un système électrique 100% renouvelable économise de l'ordre d'un milliard d'euros par an, soit 2% du coût total annuel de la fourniture d'électricité. Ces économies sont dues en majorité à la réduction des capacités de stockages électriques. Elles s'élèvent à 6 c€ par kWh fourni au réseau.
- | **En moyenne, moins de 15% du volume des batteries est sollicité chaque jour pour déstockage sur le réseau électrique** ; par exemple, pour un volume de 40 kWh - dont 15 kWh exploitables pour le service de stockage - et une puissance de 7 kW, le système électrique n'utilise en moyenne que 5 kWh par jour^{7,8}, soit un ordre de grandeur similaire à la consommation journalière pour les déplacements⁹.
- | **La sollicitation des batteries de véhicules comme stockages électriques est plus intense dans les régions bénéficiant des plus fortes capacités installées de panneaux solaires photovoltaïques.**

Si la présente étude repose sur des données et modèles pointus, elle possède cependant nécessairement certaines limites, notamment parce qu'**elle ne représente pas le réseau de distribution et ne mesure pas les effets sur celui-ci** de l'utilisation des batteries des véhicules comme stockages. Les résultats obtenus constituent en outre des hypothèses de départ pour des études complémentaires susceptibles de confirmer **l'acceptabilité, pour les propriétaires, de la sollicitation des batteries de leurs véhicules comme stockages**, ainsi que la **compatibilité de cette sollicitation avec une résistance durable des technologies** (développées à l'horizon 2050). Des perspectives sont ainsi aujourd'hui ouvertes pour approfondir ces questions non traitées, et également pour élargir le périmètre des analyses coûts-bénéfices déjà effectuées.

⁶ Correspondant à une forte consommation électrique et une faible production éolienne.

⁷ Avec une puissance de pointe journalière moyenne de l'ordre de 1 kW pour le déstockage.

⁸ Pour les batteries d'un volume de 120 kWh, dont 60 kWh exploitables pour rendre un service de stockage, 15 kWh sont injectés sur le réseau en moyenne chaque jour (pour une consommation journalière moyenne de l'ordre de 8kWh).

⁹ Consommation de 5 kWh/jour, avec une puissance de pointe journalière moyenne de l'ordre de 1 kW pour la recharge.

Table des matières

SYNTHÈSE	3
1 INTRODUCTION	6
2 CADRAGE DE L'ETUDE	7
2.1 PRINCIPALES HYPOTHESES	7
2.1.1 PARC DE VEHICULES	7
2.1.2 CONSOMMATION ELECTRIQUE.....	7
2.1.3 FLEXIBILITE DE LA RECHARGE DES VEHICULES ELECTRIQUES ET HYBRIDES	8
2.1.4 DIFFERENTIATION DES TYPES DE VEHICULES EN FONCTION DES COMPOTEMENTS TYPES DES UTILISATEURS	8
2.2 DEMARCHE D'ETUDE ADOPTEE.....	9
2.2.1 PRINCIPE GENERAL	9
2.2.2 CALCULS REALISES	9
2.2.3 AXES D'ANALYSES	9
2.3 PERIMETRE	10
3 RESULTATS OBTENUS.....	11
3.1 IMPACT DE L'UTILISATION DES BATTERIES DES VEHICULES COMME STOCKAGE POUR LE SYSTEME	11
3.1.1 IMPACT SUR LE MIX ELECTRIQUE.....	11
3.1.2 IMPACT SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE ELECTRIQUE.....	12
3.1.3 IMPACT ECONOMIQUE	13
3.1.4 IMPACT SOCIETAL.....	13
3.2 SENSIBILITE DES RESULTATS A L'ACCEPTABILITE SOCIETALE.....	13
3.2.1 PRESENTATION DES CONTRAINTES D'ACCEPTABILITE	14
3.2.2 IMPACT SUR LE MIX ELECTRIQUE	14
3.2.3 IMPACT SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE ELECTRIQUE.....	14
3.2.4 IMPACT ECONOMIQUE	15
3.2.5 IMPACT SOCIETAL.....	15
3.3 IMPACT DES MODALITES DE RECHARGE ET DU SERVICE DE STOCKAGE SUR LE FONCTIONNEMENT DES VEHICULES	15
3.3.1 MODALITES DE RECHARGE DES VEHICULES POUR LEUR PROPRE USAGE	15
3.3.2 PRISE EN COMPTE DES DIFFERENCES REGIONALES	16
4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	19
5 ANNEXES	21
5.1 LEXIQUE.....	21
5.2 PRECISIONS SUR LES MODELES ET LES DONNEES	21
5.2.1 LE PARC DE VEHICULE.....	21
5.2.2 CONSOMMATION ELECTRIQUE ET CONSOMMATION DE CARBURANT	25
5.2.3 PROFIL DE PRESENCE A LA BORNE DE RECHARGE	28
5.2.4 PRECISIONS SUR LES DIFFERENCES D'HYPOTHESES AVEC L'ETUDE ADEME 2050.....	33
5.2.5 MODELE D'OPTIMISATION	34
BIBLIOGRAPHIE.....	36
TABLE DES FIGURES.....	37
TABLE DES TABLEAUX.....	38

1 INTRODUCTION

L'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016), publiée en janvier 2016, portait sur la possibilité d'atteindre un mix électrique 100% renouvelable en France à l'horizon 2050, et analysait les contraintes techniques, économiques et sociétales relatives à un tel parc de production. Les hypothèses retenues pour réaliser cette étude, qui portait sur un horizon de temps relativement lointain, tenaient compte des nouveaux usages de consommation, liés notamment au développement du numérique et à la consommation des véhicules électriques. Dans ce cadre, la consommation des véhicules électriques sur le réseau était finement modélisée, avec une possibilité de piloter la recharge¹⁰ d'environ la moitié d'entre eux. Néanmoins, si les travaux (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) ont mis en évidence le caractère crucial des moyens de flexibilité dans le cadre d'un mix électrique fortement renouvelable, l'opportunité d'utiliser les batteries des véhicules électriques comme des stockages pouvant injecter de l'énergie sur le réseau n'y a pas été étudiée.

La présente étude se concentre alors sur l'évaluation du gain pour la collectivité d'exploiter les capacités de stockage et déstockage des véhicules électriques pour aider à satisfaire les besoins de flexibilité d'un système électrique 100% renouvelable. Elle se place dans un contexte similaire à celui de (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016)¹¹, et suppose que les batteries des véhicules électriques peuvent en partie être utilisées comme des stockages à disposition du système électrique (sous des contraintes représentatives du besoin et du confort des utilisateurs)¹². Elle permet de mesurer les gains de ce service pour la collectivité, en termes économiques, technologiques (à quel moyen de flexibilité se substituent les batteries des véhicules) mais également sociétaux (quelle emprise au sol économisée).

Cette étude a été réalisée dans le cadre du lot TMM-MIC-T4.2 du projet MIC, mené par l'IRT SystemX, qui s'attache à évaluer l'opportunité de considérer le transport comme un possible producteur d'énergie, et non seulement comme un consommateur d'énergie.

¹⁰ Leur consommation électrique était ainsi placée aux heures optimales pour le système électrique, en tenant compte de contraintes relatives aux besoins des consommateurs ainsi qu'aux instants de présence des véhicules sur les bornes de recharge.

¹¹ Certaines des hypothèses relatives aux véhicules électriques ont cependant été affinées, comme cela est décrit en annexe, au paragraphe 5.2.4.

¹² Dans un respect de cohérence du jeu d'hypothèses, on suppose alors que l'intégralité (et non la moitié) des recharges de batteries de véhicules électriques et hybrides sont pilotables.

2 CADRAGE DE L'ETUDE

2.1 Principales hypothèses

2.1.1 Parc de véhicules

On suppose qu'à l'horizon 2050, le parc automobile est constitué de 22 millions de véhicules répartis de la manière suivante¹³ :

- | 34% de véhicules utilisant un unique combustible thermique (fioul ou gaz), hybrides non rechargeables inclus
- | 38% de véhicules hybrides rechargeables (électricité et combustible thermique),
- | 23% de véhicules électriques dits "standards"¹⁴
- | 5% de véhicules électriques dits "longue-distance"¹⁵

2.1.2 Consommation électrique

2.1.2.1 Volume

La consommation d'électricité annuelle des véhicules électriques et hybrides – VE – est déduite d'une approche « top-down », à partir d'hypothèses et données relatives à :

- | la distance annuelle parcourue,
- | la répartition du parc de véhicules (2.1.1),
- | des statistiques sur la distribution entre les déplacements locaux et plus lointains,
- | les consommations au kilomètre en fonction des types de trajets (locaux ou plus lointains).

La Table 1 récapitule la consommation moyenne journalière de l'ensemble des véhicules, par type d'usage (quotidien ou longue distance).

	Usage quotidien	Usage longue-distance
Consommation électrique journalière moyenne (GWh _e)	78	16
Consommation thermique journalière moyenne (GWh _{th})	114	112

Table 1 – Consommation journalière des véhicules

2.1.2.2 Profil

Des profils de consommation au pas de temps journalier sont construits à partir de données statistiques¹⁶ de ratios journaliers de présence au domicile¹⁷ pour les véhicules longue-distance et à

¹³ Hypothèse similaire à celle de (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016).

¹⁴ Par « standard », on entend ici une technologie proche de celles d'aujourd'hui, avec une batterie de 40 kWh (dont 15 kWh utilisables pour stockage par le système électrique).

¹⁵ Les véhicules dits « longue-distance » possèdent des batteries de plus grande taille, soit 120 kWh dont la moitié utilisable pour stockage par le système électrique.

¹⁶ Des détails des calculs sont fournis en annexe, aux paragraphes 5.2.2 et 5.2.3.

¹⁷ D'après (Ministère du Tourisme, 2005), données de l'année 2005 projetées à 2011-2012.

partir de répartition des déplacements en fonction du jour de la semaine¹⁸ pour les déplacements locaux (avec prise en compte de contraintes calendaires telles que les vacances scolaires et jours fériés¹⁹). Les profils exploités reflètent ainsi les périodes et heures de consommation plus importantes liées aux congés ou aux rythmes de travail.

2.1.3 Flexibilité de la recharge des véhicules électriques et hybrides

L'intégralité de la recharge électrique des véhicules est supposée pilotable²⁰. La recharge est ainsi placée aux heures les plus opportunes pour le système²¹, en respectant des contraintes assurant la faisabilité technique et le confort des utilisateurs :

- | Chaque jour, les batteries doivent être chargées d'une quantité correspondant à la consommation journalière du véhicule.
- | La recharge ne peut avoir lieu que lorsque les véhicules sont connectés au réseau électrique.
- | La puissance maximale d'injection d'un véhicule sur le réseau est de 7 kW, ainsi que la puissance maximale cumulée de charge et de stockage.

Remarque : pour l'ensemble des calculs effectués dans le cadre de cette étude, la recharge de l'intégralité des véhicules a été supposée pilotable (en cohérence avec l'utilisation des batteries comme stockages pour le système électrique). Le gain associé à la mise en place d'une telle flexibilité n'a ainsi pas été évalué.

2.1.4 Différentiation des types de véhicules en fonction des comportements types des utilisateurs

Puisque les véhicules doivent être connectés au réseau électrique pour pouvoir réapprovisionner leurs batteries, des profils de présence aux bornes de recharge sont exploités ; trois profils distincts sont considérés en fonction des caractéristiques des utilisateurs (véhicules utilisés pour se rendre sur le lieu de travail ou non, présence ou absence de borne de recharge au domicile ou sur le lieu de travail, etc.) :

- Le profil « faiblement contraint » concerne les véhicules presque toujours connectés à une borne de recharge²², soit 82% des véhicules électriques et hybrides.
- Le profil « charge de jour » est associé aux conducteurs utilisant leurs véhicules pour se rendre sur leur lieu de travail et bénéficiant d'une borne de recharge à leur lieu de travail et non à leur domicile (et dont la charge ne peut donc être opérée que de jour), soit 13% des véhicules électriques et hybrides.²³ Cette catégorie ne peut effectuer de recharge au cours du week-end²⁴.
- Le profil « charge de nuit » est relatif aux conducteurs qui ne bénéficient de bornes de recharges qu'à leurs domiciles, et utilisent leurs véhicules pour se rendre au travail, soit 5% des véhicules

¹⁸ D'après (Commissariat Général au Développement Durable, 2010), données analysées par Renault.

¹⁹ En période de vacances scolaires, les déplacements se trouvent réduits de 1% à 3% (en fonction du nombre de zones concernées).

²⁰ Contrairement aux hypothèses de (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) selon lesquelles seule la moitié du parc de véhicules a une recharge pilotable.

²¹ Ces « heures les plus opportunes » sont calculées par l'optimisation, dont le principe général est décrit au paragraphe 2.2.2.

²² Bornes de recharges disponibles à la fois au domicile et sur le lieu de travail lorsque le véhicule est utilisé pour s'y rendre.

²³ On ne considère pas de profils spécifiques pour les 3% de conducteurs qui travaillent de nuit ou le week-end.

²⁴ L'équivalent de la consommation électrique du week-end doit alors être rechargé le mardi, en même temps que la consommation du lundi. La possibilité de se charger le week-end, par exemple sur des parkings de supermarchés, n'a pas été prise en compte.

électriques et hybrides. Les jours de semaine, ces véhicules se rechargent ainsi essentiellement la nuit.

L'ensemble de ces profils, qui dépendent du jour de la semaine et de l'heure du jour, ont été reconstitués à partir de données statistiques de stationnement²⁵.

2.2 Démarche d'étude adoptée

2.2.1 Principe général

L'objectif de la présente étude est de mesurer l'effet de l'utilisation des batteries des véhicules comme stockage pour le système. Dans cette optique, on compare, toutes choses égales par ailleurs, un cas où les batteries des véhicules ne rendent pas de service de stockage à un cas où les batteries sont utilisées comme moyen de stockage par le système électrique.

La résilience du résultat obtenu vis-à-vis des hypothèses retenues est vérifiée par un second calcul, pour lequel on se place dans un contexte d'acceptabilité sociale des EnR plus contrainte (qui se traduit par des puissances maximales installables plus faibles pour les technologies éoliennes et solaires). Dans ce contexte, on compare également un cas sans utilisation des batteries des véhicules comme stockage à un cas avec utilisation de ces batteries comme stockage.

2.2.2 Calculs réalisés

Pour chacun des cas étudiés, on optimise – suivant un critère économique – les capacités de production, de stockage et d'échange du mix électrique français à la maille régionale, tout en simulant sur un an au pas de temps horaire la gestion optimisée de la fourniture d'électricité.

Les contraintes imposées au modèle sont les suivantes :

- | Le mix français doit produire 100% d'électricité renouvelable ;
- | L'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité doit être satisfait à chaque heure de l'année ;
- | Les contraintes de gestion dynamique des stockages (notamment les batteries des véhicules) ;
- | Les contraintes techniques liées au pilotage des productions et consommations flexibles (notamment celles relatives aux VE) ;
- | Un bilan importateur globalement neutre sur l'année²⁶.

Un coût est associé à l'installation de chaque filière ainsi qu'à l'installation de lignes interrégionales. Les résultats détaillés dans le présent rapport sont ainsi le fruit d'un calcul de minimisation du coût de la fourniture d'électricité, qui assure le respect des contraintes techniques décrites ci-dessus. L'optimisation permet dès lors d'identifier le « meilleur » – au sens économique du terme – scénario qui satisfera ces contraintes.

Le modèle d'optimisation est décrit plus précisément en annexe 5.2.5.

2.2.3 Axes d'analyses

L'effet de l'utilisation des batteries des véhicules comme stockages est analysé suivant différents axes :

- Impact sur le mix électrique, et sur les autres moyens de stockage mis en place : la répartition entre le photovoltaïque et l'éolien est-elle modifiée ? Les autres moyens de stockage se voient-ils réduits, et dans quelle mesure ?
- Impact économique : le coût global annuel de la fourniture d'électricité diminue-t-il ? (L'impact économique étant calculé sans prendre en compte les coûts des chargeurs réversibles²⁷, ni ceux

²⁵ Issues de (Commissariat Général au Développement Durable, 2010), p 120. Les emplacements de stationnement privés sont supposés être équipés d'une prise de charge.

²⁶ Le total d'électricité importée sur l'année est égal au total d'électricité exportée.

d'éventuels points de charge supplémentaires installés pour bénéficier des services de stockage rendus par les VE)

- Impact sociétal : le système a-t-il moins recours aux effacements de consommation ? Et l'emprise au sol du système se trouve-t-elle réduite ?

2.3 Périmètre

L'ensemble des prix sont exprimés en euro 2012 (unité de référence de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016)).

Si une modélisation très fine du système électrique est adoptée pour la présente étude²⁸ (modélisation régionale, avec optimisation de l'ensemble des capacités de production, de stockage et d'échange de chaque région, et simulation au pas de temps horaire de l'équilibre offre-demande électrique), certains éléments spécifiques n'ont pas été représentés, en cohérence avec les hypothèses de (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016), tels que le réseau de distribution, la flexibilité de la consommation électrique du transport public, l'analyse du cycle de vie des technologies considérées, ou le coût de la transition pour parvenir au scénario étudié. En outre, le gain relatif au pilotage de la recharge des véhicules²⁹ n'a pas été analysé.

Par ailleurs, l'étude ne se positionne pas sur les dispositifs incitatifs³⁰ ni les déploiements technologiques à mettre en place pour guider les comportements des utilisateurs.

²⁷ Ces coûts pourront être comptabilisés a posteriori, notamment en déduisant les durées de vies (et coûts annualisés des chargeurs) à partir des courbes de charge et décharge des batteries obtenues en sortie du modèle.

²⁸ Les profils de production des filières marines ont été reconstitués grâce aux données issues de la base Previmer

²⁹ Son coût est quant à lui bien intégré au bilan économique global.

³⁰ Acceptabilité des utilisateurs de ne pas récupérer systématiquement leur batterie chargée totalement, fluctuation de l'état de charge des batteries en fonction de la météorologie.

3 RESULTATS OBTENUS

3.1 Impact de l'utilisation des batteries des véhicules comme stockage pour le système

3.1.1 Impact sur le mix électrique

La Figure 1 et la Figure 2 illustrent l'impact de l'utilisation des batteries des VE comme stockage sur le mix électrique : on y constate que 3 GW supplémentaires de solaire photovoltaïque (PV) sont installés au détriment d'éolien terrestre. En effet, le stockage gratuit assuré par les batteries des VE permet de déplacer gratuitement l'énergie solaire qui excède la demande l'après-midi. L'énergie solaire revenant moins chère (en moyenne) que l'énergie éolienne, le fait de pouvoir la déplacer (sans surcoûts) aux moments opportuns pour le système la rend plus favorable. Ainsi, on observe une baisse de l'éolien terrestre du cas de référence là où il est le moins rentable (c'est-à-dire là où son taux de charge³¹ est le plus faible, comme par exemple en région Poitou-Charentes) et une augmentation du PV sur toitures là où il est le plus avantageux (avec un taux de charge élevé, comme c'est le cas en région Rhône-Alpes). En outre, le taux de charge éolien étant environ le double de celui du PV³², la substitution de 2 GW d'éolien par 3 GW de PV, occasionne une baisse de la production annuelle de 1 TWh (et ainsi une réduction du surplus électrique non exploité).

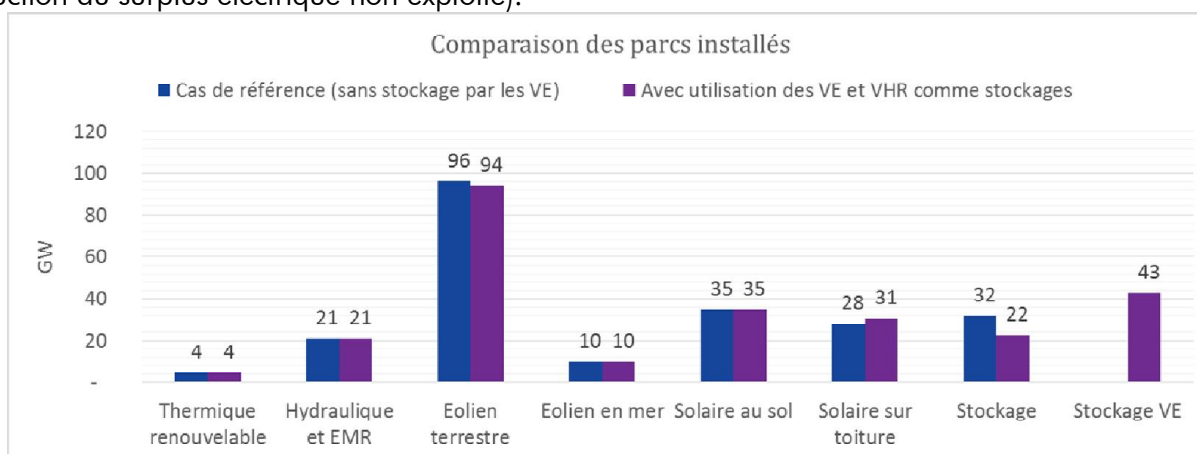


Figure 1 - Impact des batteries des VE sur le mix électrique (GW)

³¹ Production d'énergie annuelle ramenée à la capacité installée.

³² Le taux de charge éolien est de 2 800 heures en moyenne pour la filière de nouvelle génération ; celui du PV au sol est de l'ordre de 1 500 heures dans les régions du sud.

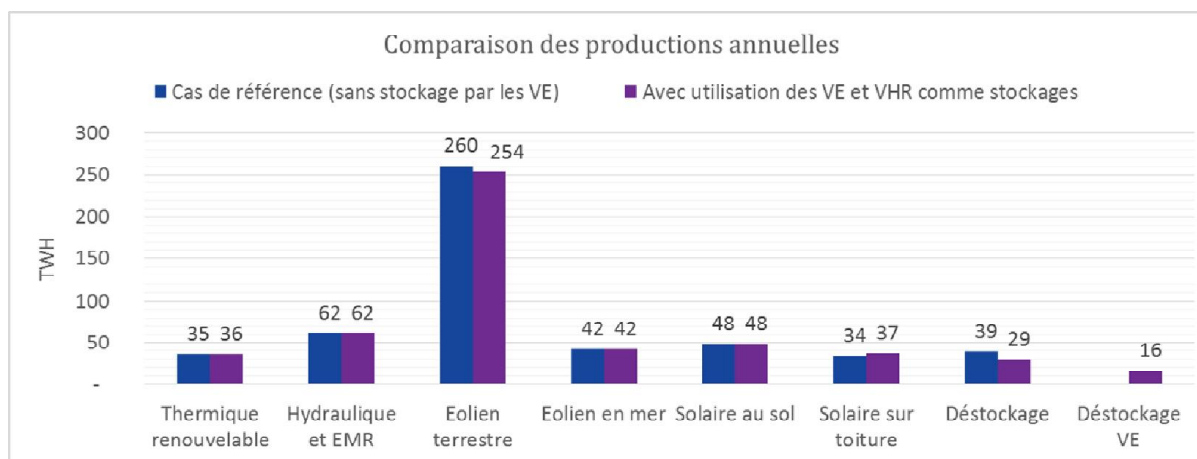


Figure 2 - Impact des batteries des VE sur le mix électrique (TWh)

3.1.2 Impact sur les installations de stockage électrique

On observe sur la Table 2 que, lorsque les batteries des VE sont utilisées comme moyen de stockage par le système électrique, celui-ci n'a pas besoin d'installer de stockage de court-terme³³ supplémentaire.

Cependant, si la puissance installée des batteries des VE aurait pu largement compenser celle du stockage inter-saisonnier³⁴, l'optimisation ne réduit que peu sa capacité. En effet, le dimensionnement des moyens de stockage est réalisé suivant un arbitrage sur les besoins en énergie – et non en puissance – du système électrique.

Le stockage inter-saisonnier est ainsi – notamment – utilisé en hiver, lors d'une vague de froid d'une semaine (avec une demande électrique élevée), coïncidant avec une production éolienne réduite. Au cours de cette semaine, une fois retirées les productions maximales par l'ensemble des moyens à disposition du système électrique, 2.2 TWh d'électricité doivent encore être fournis pour satisfaire la demande. Ces 2.2 TWh sont puisés dans les stocks inter-saisonniers.

	Cas de référence		Avec utilisation des batteries des VE comme stockages	
	Puissance (GW)	Volume (GWh)	Puissance (GW)	Volume (GWh)
Batteries des VE utilisées comme stockage	–	–	43	142
Stockage de court-terme (type CAES) installé par l'optimisation	9	54	0	0
STEP (l'optimisation n'en)	7	224	7	224

³³ Le stockage dit « de court-terme », ou encore « infra-journalier », est caractérisé par un ratio peu élevé entre sa capacité en énergie et sa puissance ; ce ratio – également appelé « temps de décharge », homogène à une durée (en heures) – représente en effet le temps mis par le stockage à décharger l'ensemble de son volume, lorsqu'il fonctionne à sa puissance maximale. Une utilisation typique des stockages de court-terme est ainsi un déplacement d'énergie entre la journée et le soir (d'où le qualificatif « infra-journalier »).

³⁴ Le stockage dit « inter-saisonnier » correspond à une chaîne « power to gas to power », où de l'électricité (EnR) est convertie en gaz de synthèse (par électrolyse et méthanation), qui est réutilisé ensuite comme combustible pour produire de l'électricité. Le gaz de synthèse est stocké au cours de l'année sur le réseau de gaz. En pratique, on observe qu'il est produit l'été (pour bénéficier des forts surplus EnR et notamment PV) et exploité l'hiver (lors des consommations électriques plus importantes), d'où son qualificatif d' « inter-saisonnier ».

installe pas au-delà de la capacité minimale)				
Stockage inter-saisonnier	16		15	

Table 2 - Impact des batteries des VE sur le stockage électriques

3.1.3 Impact économique

L'utilisation des batteries des VE comme moyens de stockage permet d'économiser de l'ordre d'un milliard d'euros par an, ce qui représente une réduction de 2% du coût total de fourniture d'électricité (et une baisse de 2 €/MWh du coût de l'énergie consommée). Ces économies se répartissent de la manière suivante :

- 72% d'économies liées à la réduction des investissements dans les moyens de stockage
 - 540 M€/an de stockage de court-terme économisés (soit 100% des coûts du stockage de court-terme)
 - 170 M€/an de stockage inter-saisonnier économisés (soit une baisse de 7% des coûts du stockage inter-saisonnier)
- 19% d'économies dues à une baisse des investissements dans les moyens de production
 - 190 M€/an économisés liés au remplacement d'éolien par du PV, moins cher (cela représente une baisse de 0.6% des coûts des ENR)
- 9% d'économies liées à une diminution des investissements réseau
 - 90 M€ /an économisés de capacités d'échange inter-régionales, soit une réduction de 4% des coûts liés aux capacités réseau.

Ces économies, ramenées au nombre de véhicules mis à contribution, reviennent à 160 € économisés par véhicule et par an.

Ces économies étant attribuées au service de stockage rendu par les batteries des VE, on peut également les ramener à la quantité d'énergie déstockée par an (16 TWh) ; elles s'élèvent ainsi à 6 c€ par kWh fourni au réseau.

Remarque : Ces économies ne tiennent pas compte des coûts potentiels additionnels sur l'infrastructure automobile (pilotage ou chargeurs réversibles). En outre, l'usure des batteries liée à l'augmentation de leur nombre de cycles d'utilisation n'est pas étudiée ici.

3.1.4 Impact sociétal

On notera également que la flexibilité apportée par l'utilisation des batteries des VE comme stockage permet une moindre sollicitation des effacements de chauffage (baisse de 8%)³⁵.

En outre, le remplacement d'éoliennes terrestres par du PV sur toitures, permet de libérer 400 km² de surface, soit 1 100 éoliennes installées en moins.

3.2 Sensibilité des résultats à l'acceptabilité sociétale

Les résultats présentés au paragraphe 3.1.4 ayant mis au jour la réduction de l'emprise au sol des éoliennes (au profit de la filière PV sur toitures) dans le cadre de l'utilisation des batteries des VE comme moyens de stockage, on s'attache ici à appréhender l'impact des VE dans un contexte d'occupation terrestre plus contrainte, qualifié de cas avec « contraintes d'acceptabilité plus importantes ».

³⁵ Cela pourrait induire des gains supplémentaires liés au marché de l'effacement ; de tels gains n'ont pas été évalués.

3.2.1 Présentation des contraintes d'acceptabilité

Les contraintes d'acceptabilité se traduisent par un gisement – ou puissance maximum installable - inférieur pour les technologies PV sur toiture, PV au sol, éolien terrestre et éolien en mer posé. La Table 3 compare ainsi l'évolution des gisements par filière en fonction du niveau de contraintes d'acceptabilité. On y observe que les contraintes d'acceptabilité portent essentiellement sur la filière éolienne terrestre.

Technologies	Réduction du gisement par les contraintes d'acceptabilité	Gisement initial en GW	Gisement sous contrainte d'acceptabilité en GW
Eolien terrestre	77%	174	40
Eolien marin posé	19%	20	16
Solaire au sol	58%	47	20
Solaire sur toiture	51%	364	179

Table 3 - Formalisation des contraintes d'acceptabilité

3.2.2 Impact sur le mix électrique

La Figure 3 illustre l'impact de l'utilisation des batteries des VE comme stockage sur un mix électrique sous contrainte d'acceptabilité : on y constate que 3 GW supplémentaires de solaire photovoltaïque sont installés à la place d'1 GW d'énergies marines. En effet, comme dans le premier contexte (décrit au 3.1.1), le déplacement gratuit d'énergie solaire la rend plus favorable au système. Les énergies marines étant plus chères que l'éolien terrestre, ce sont elles qui se voient substituées en premier lieu.

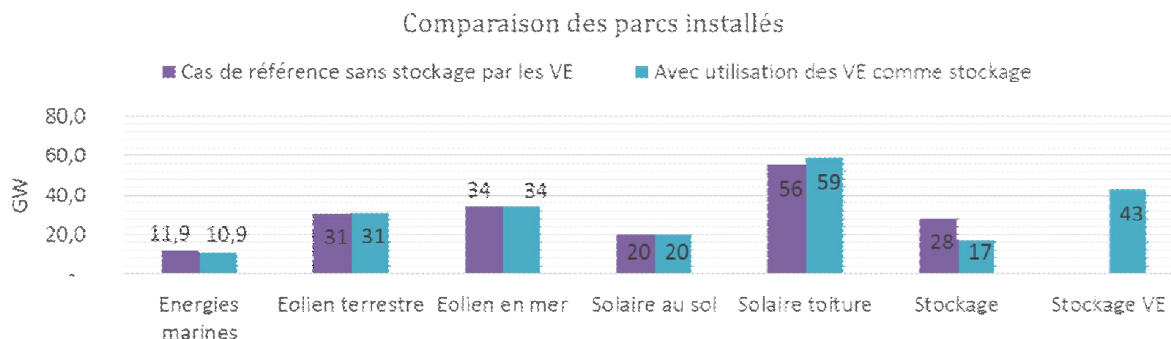


Figure 3 - Impact des batteries des VE sur le mix électrique (GW), calculs avec contraintes d'acceptabilité

3.2.3 Impact sur les installations de stockage électrique

On observe sur la Table 4 un impact sur le stockage similaire à celui constaté après les calculs du premier cas.

	Cas de référence		Avec utilisation des batteries des VE comme stockages	
	Puissance (GW)	Volume (GWh)	Puissance (GW)	Volume (GWh)
Batteries des VE utilisées comme stockage	–	–	43	142
Stockage de court-terme (type CAES) installé par	11	66	0	0

l'optimisation				
STEP (l'optimisation n'en installe pas au-delà de la capacité minimale)	7	224	7	224
Stockage inter-saisonnier	11		10	

Table 4 - Impact des batteries des VE sur le stockage électrique, avec contraintes d'acceptabilité

3.2.4 Impact économique

Dans un contexte d'acceptabilité des ENR réduite, l'utilisation des batteries des VE comme moyens de stockage permet également d'économiser de l'ordre d'un milliard d'euros par an – soit 1,7% du coût total, ce qui représente toujours de l'ordre de 160 € d'économies par véhicule et par an.

La Table 5 compare les économies attribuées à l'utilisation des batteries des VE comme stockage, par postes de coûts, dans le cadre du premier cas d'étude et dans celui des contraintes d'acceptabilité.

	Premier cas d'étude		Calculs sous contraintes d'acceptabilité	
	Economies (M€)	Economies (%)	Economies (M€)	Economies (%)
Coût total du système	980	2%	975	1.7%
Stockage de court-terme	540	100%	660	100%
Stockage inter-saisonnier	160	7%	80	5%
Capacité des ENR	190	0,6%	190	0,5%
Capacités d'échange	90	4%	40	1,4%

Table 5 - Impact économique des batteries des VE, répartition par poste de coûts

3.2.5 Impact sociétal

Dans le cadre de contraintes d'acceptabilité, la flexibilité apportée par l'utilisation des batteries des VE comme stockage a également pour conséquence une baisse de 5% de l'appel aux effacements de chauffage.

Cependant, étant donné la baisse notable du gisement de l'énergie éolienne, les batteries des VE ne permettent pas de réduction supplémentaire de cette technologie (mais plutôt une baisse des énergies marines, plus chères).

3.3 Impact des modalités de recharge et du service de stockage sur le fonctionnement des véhicules

3.3.1 Modalités de recharge des véhicules pour leur propre usage

La Figure 4 illustre le pilotage optimisé de la recharge de batteries dans le cadre d'un mix électrique 100% EnR ; on y observe qu'en moyenne, en France (courbe noire), la charge a essentiellement lieu l'après-midi, pour bénéficier de la production photovoltaïque.

En outre, le modèle régional permet d'appréhender des comportements différents entre les régions, en fonction des mix EnR (et de la répartition PV/éolien) locaux. Ainsi, en PACA (avec 10 GW de PV installés), 95% de la recharge s'effectue pendant les heures d'ensoleillement maximales, tandis que la charge des véhicules d'Ile de France (où 3 GW de PV sont installés) est répartie de manière plus homogène entre la nuit (où la demande électrique est plus faible) et les heures de production PV.

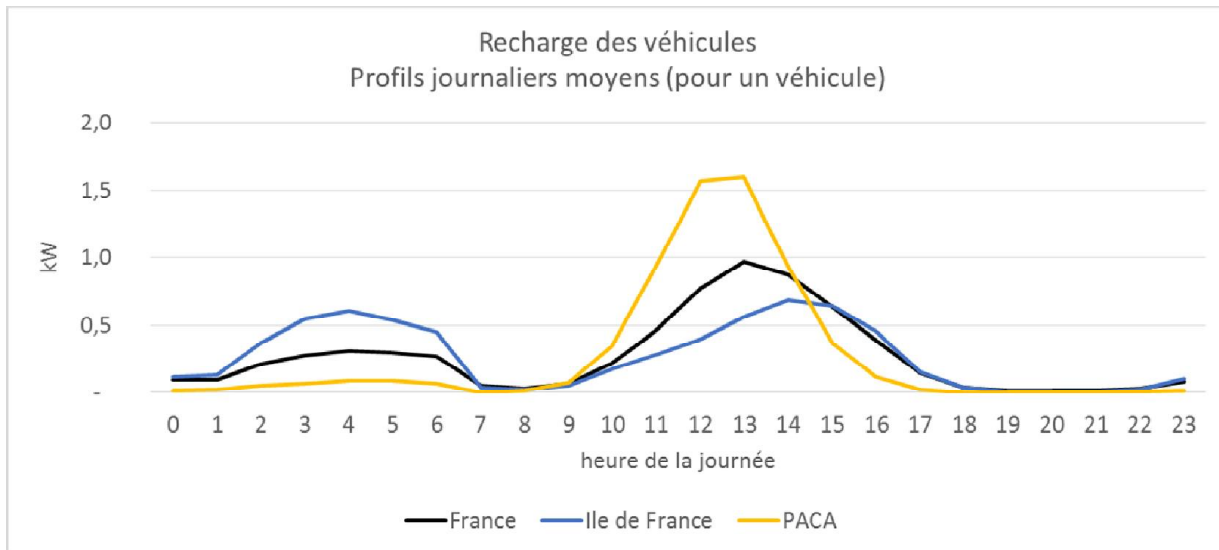


Figure 4 – Illustration : profils de recharge des véhicules faiblement contraints

3.3.2 Prise en compte des différences régionales

A l’avenant des comportements de recharge, on observe sur la Figure 5 qu’en région PACA, les batteries des VE sont essentiellement exploitées pour stocker de l’énergie PV aux heures d’ensoleillement important (courbe jaune), et la déstocker au moment de la pointe du soir, alors qu’en Ile de France, le stockage par les batteries des VE est réparti plus uniformément pendant la journée (courbe bleue). Le déstockage a quant à lui essentiellement lieu pour aider à satisfaire la pointe de consommation du soir (courbes orange, violette et grise).

La Figure 5 illustre également que les batteries des véhicules sont en moyenne peu sollicitées : le système n’exploite qu’une quantité déstockée de 8 kWh par jour³⁶, avec une puissance maximale de 4 kW sur l’ensemble de l’année, en moyenne sur les différentes régions et sur l’ensemble des VE au profil « faiblement contraint ». Plus précisément, on note également sur la Figure 5 que les batteries des véhicules de la région PACA sont plus sollicitées comme stockages par le système électrique que dans les autres régions, du fait de la capacité installée plus importante de PV (en moyenne les batteries déstockent 13 kWh par jour).

³⁶ Cette moyenne journalière a été calculée sur l’ensemble des VE standards et longue-distance au profil faiblement contraint. Tous profils confondus, la moyenne journalière déstockée par les VE standards est de 5kWh/jour/VE, celle déstockée par les VE longue-distance est de 15 kWh/jour/VE, et la moyenne sur tous les types de VE est de 7 kWh/jour/VE.

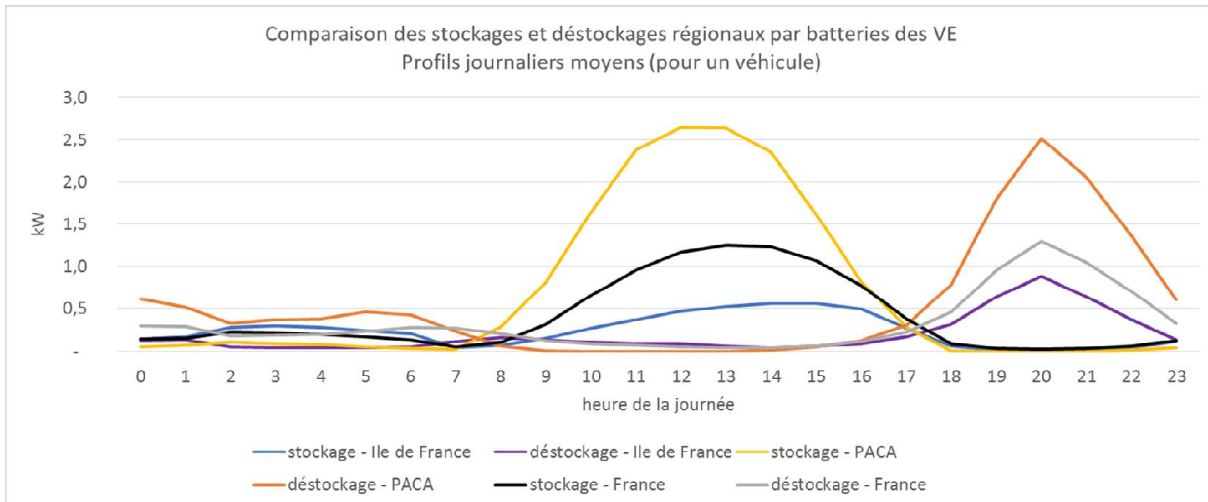


Figure 5 - Illustration : Profils de stockage et déstockage des batteries des VE « faiblement contraints »

La Figure 6 agrège le profil de stockage pour recharge des batteries des VE (pour leur usage de « roulage ») et celui de stockage pour rendre service au système électrique (et déstocker ultérieurement). En moyenne, les véhicules soutirent de l'ordre de 2 kW sur le réseau pendant les heures de fort ensoleillement (4 kW pour ceux de la région PACA).

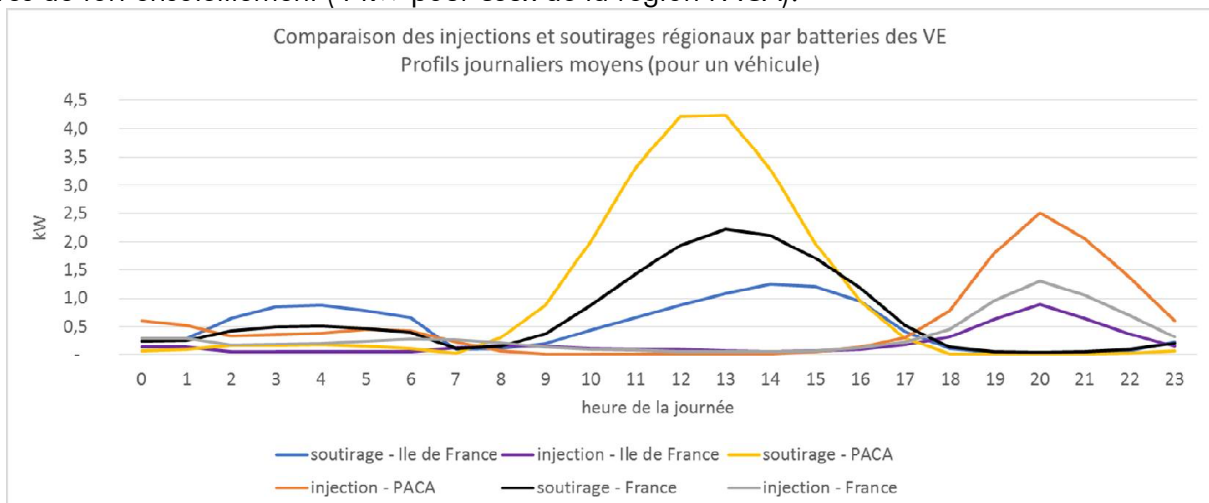


Figure 6 - Illustration : Profils d'injection et soutirage sur le réseau des batteries des VE « faiblement contraints »

En outre, en moyenne sur la France (courbe noire de la Figure 7) l'ensemble des batteries sont exploitées comme stockage pendant les mois printaniers et estivaux (entre mars et octobre) correspondant à une production PV plus importante, avec néanmoins une baisse d'utilisation en août du fait du taux d'absence conséquent des propriétaires des véhicules pendant les vacances (qui ne sont alors plus disponibles pour servir de stockage). Cependant, le comportement saisonnier dépend également des caractéristiques régionales, comme l'illustre la Figure 7 : la faible disponibilité des VE en août pour être utilisée comme stockage est compensée en région PACA par un ensoleillement important.³⁷

³⁷ Sur la figure, on observe également une augmentation de l'utilisation du stockage par les batteries des VE en décembre ; cette période correspond à une utilisation plus importante de l'ensemble des moyens de stockages électriques (stockage de court-terme et STEP) du fait d'une forte production éolienne. Les variations de la production éolienne de cette période sont lissées par l'ensemble des moyens de stockage à disposition du système, de manière à satisfaire la demande en France et à réaliser des exports du surplus éolien.

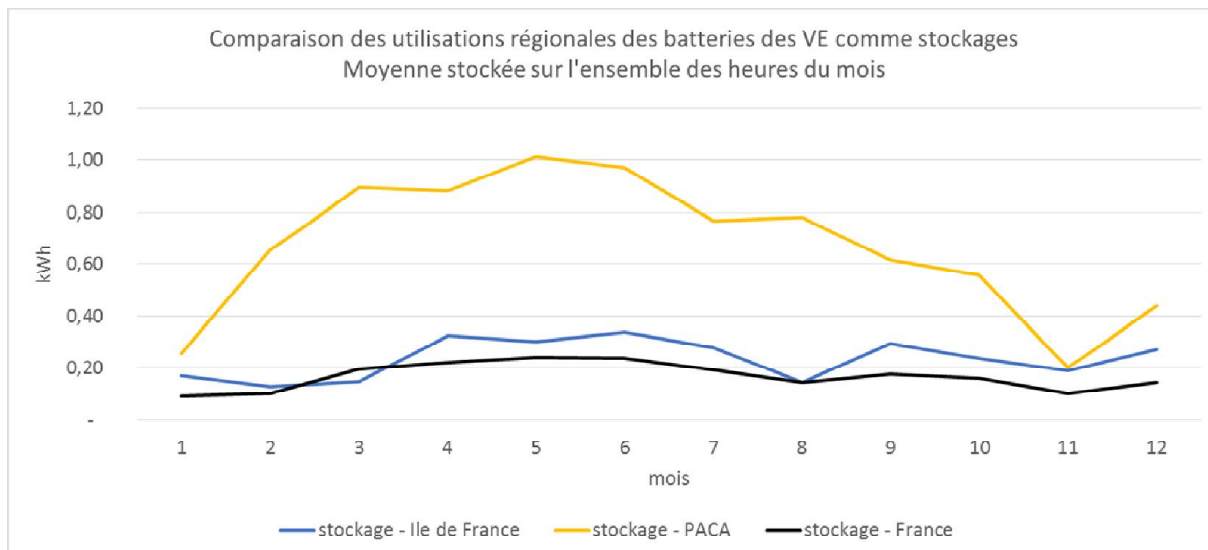


Figure 7 - Illustration : Utilisation saisonnière des batteries des VE « faiblement contraints » comme stockages

Globalement, si la recharge et le stockage des batteries ont lieu pour l'essentiel pendant l'après-midi aux heures d'ensoleillement maximal, le phénomène est plus ou moins accentué selon les régions et la répartition locale de la production EnR. Le déstockage sert essentiellement à satisfaire la pointe nocturne de consommation.

4 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La présente étude a mis en évidence l'intérêt d'utiliser les batteries de véhicules comme moyens de stockage au sein d'un mix électrique fortement renouvelable, caractérisé par d'importants besoins de flexibilité pour compenser l'intermittence de ses moyens de production.

Ainsi, les batteries des véhicules permettent d'économiser 2% du coût annuel de la fourniture d'électricité (soit 1 Md € /an, ou encore 160 €/VE/an), tout en réduisant l'emprise au sol des producteurs de 2% (soit 400 km² de surface occupée³⁸ en moins).

Différentes pistes d'approfondissement des résultats de l'étude sont aujourd'hui ouvertes :

- | Etudes relatives à l'évaluation de la valeur des VE pour le système électrique
 - Evaluation des gains économiques relatifs à la flexibilité de la recharge³⁹
 - Analyse de la sensibilité des résultats au taux d'EnR du mix électrique considéré : dans le cadre d'un mix électrique 40% EnR, caractérisé par moins de besoins de flexibilité, les économies liées au stockage par batteries des VE sont-elles réduites ? L'utilisation des batteries des VE comme stockage gratuit inverse-t-elle la proportion PV/éolien d'un mix électrique à 40% ou 80% EnR ?
- | Validation par des acteurs du secteur automobile de la faisabilité technico-économique du concept
 - Comparaison des coûts « matériels » (fonction réversibilité des chargeurs, dégradation supplémentaire de la batterie) aux gains qu'ils permettent de réaliser
- | Etudes relatives à l'usage de véhicules au gaz de synthèse
 - Etude d'une technologie innovante : les véhicules hybrides injectant de l'électricité sur le réseau peuvent-ils concurrencer le stockage inter-saisonnier ?
 - Evaluation d'un gain économique lié à la décarbonisation des transports : quel impact de l'augmentation du parc de véhicules hybrides au gaz de synthèse (au détriment du parc de véhicules thermiques) ? Quels bénéfices apporterait l'utilisation de biogaz ou de gaz de synthèse en substitution du gaz naturel pour les véhicules thermiques ?
- | Etudes relatives à une modification du parc de véhicules
 - Calcul du nombre optimal de batteries de VE à utiliser comme stockage au service du système

³⁸ Il ne s'agit pas ici de surface « artificialisée » ; sur les 17 000 km² d'emprise au sol des éoliennes, 1% correspondent à une surface « artificialisée » (les 99% restants étant compatibles avec d'autres usages des sols tels que l'agriculture).

³⁹ Si ces gains n'ont pas été évalués dans le cadre de la présente étude (où l'on supposait 100% des recharges flexibles pour tous les cas analysés), on peut anticiper des gains économiques d'un ordre de grandeur similaire à celui de l'utilisation des batteries des VE comme moyens de stockage. En effet, ces gains avaient été évalués dans (ADEME, Artelys, ATEE, ENEA Consulting, 2013) à 80 M€/an dans le cadre d'un scénario 2030 au mix électrique 50% EnR (aux besoins de flexibilité par conséquent moindre qu'un mix électrique 100% EnR) pour 5 TWh de consommation électrique de véhicule rendue flexible (soit 7 fois moins que dans les hypothèses de l'étude actuelle). On notera un ordre de grandeur similaire sur la différence de coûts de l'ordre de 450 M€/an entre le cas de référence de (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) et celui de la présente étude, dont les hypothèses diffèrent en particulier sur la part pilotable des recharges des véhicules (50% et 100% respectivement).

- Optimisation de la répartition du parc de véhicules (avec une répartition régionale liée aux mix EnR locaux)

5 ANNEXES

5.1 Lexique

Abréviation	Signification
CAES	Compressed Air Energy Storage (stockage d'énergie par air comprimé)
EnR	Energies Renouvelables
PV	Photovoltaïque
STEP	Station de transfert d'énergie par pompage ⁴⁰
VE	Véhicules électriques ou hybrides
VHR	Véhicules hybrides rechargeables

5.2 Précisions sur les modèles et les données

5.2.1 Le parc de véhicule

5.2.1.1 Répartition géographique des véhicules

La Figure 8 illustre la répartition régionale des véhicules (qui diffère de celle utilisée dans l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016)).

Remarque : La répartition des types de véhicule (décrits dans le paragraphe 2.1.3) est identique par région.

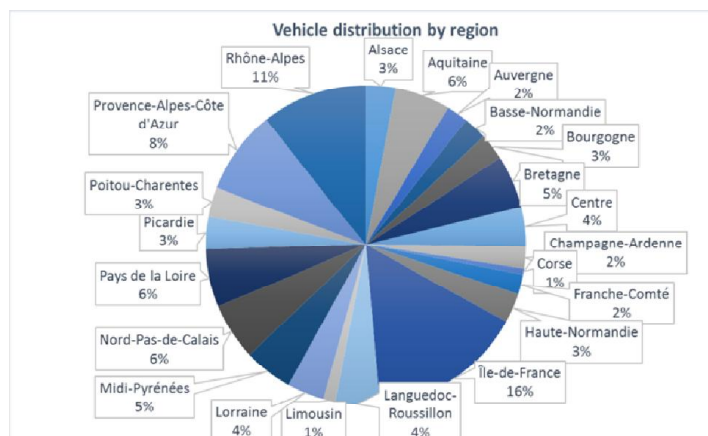


Figure 8 – Distribution régionale des véhicules (%)

5.2.1.2 Résumé des hypothèses : stockage additionnel dans chaque région

La capacité de stockage qui peut être sollicitée par le système électrique (Table 6 et Table 7) est déduite de la description du parc (paragraphe 2.1.1) et de la répartition régionale des véhicules (paragraphe 5.2.1.1). On y constate que la capacité nationale des batteries des VE (en GWh) est supérieure à la capacité optimale du stockage court-terme de l'étude Ademe. La Figure 9 et la Figure 10 illustrent cette comparaison à une échelle régionale, tous VE confondus.

⁴⁰ Il s'agit d'installations de stockage hydroélectrique.

	Total de batteries standards (GWh)	Total de batteries longue-distance (GWh)	Total des batteries de VE utilisées comme stockages électriques (GWh)	Taille optimale du stockage de court-terme dans l'étude (Ademe, 2016) (GWh)	Taille optimale du stockage hebdomadaire dans l'étude (Ademe, 2016) (GWh)	Taille optimale du stockage de court- et moyen-terme dans l'étude (Ademe, 2016) (GWh)
Alsace	2,3	2,0	4,3	6,4	-	6,4
Aquitaine	4,2	3,7	7,9	9,1	-	9,1
Auvergne	1,7	1,5	3,1	0,0	-	0,0
Basse-Normandie	1,8	1,5	3,3	2,1	-	2,1
Bourgogne	2,0	1,7	3,7	0,0	-	0,0
Bretagne	4,0	3,5	7,5	3,5	1,4	5,0
Centre	3,1	2,7	5,8	5,2	-	5,2
Champagne-Ardenne	1,7	1,4	3,1	0,0	37,1	37,1
Corse	0,5	0,4	0,9	-	-	-
Franche-Comté	1,5	1,3	2,8	0,0	-	0,0
Haute-Normandie	2,3	2,0	4,3	1,8	-	1,8
Île-de-France	11,9	10,3	22,2	0,0	-	0,0
Languedoc-Roussillon	3,4	3,0	6,3	2,9	-	2,9
Limousin	0,9	0,8	1,7	1,2	-	1,2
Lorraine	2,9	2,5	5,3	3,4	-	3,4
Midi-Pyrénées	3,7	3,2	6,9	0,0	46,8	46,8
Nord-Pas-de-Calais	4,4	3,8	8,2	11,6	-	11,6
Pays de la Loire	4,4	3,8	8,2	5,1	-	5,1
Picardie	2,6	2,2	4,8	5,2	-	5,2
Poitou-Charentes	2,3	2,0	4,3	3,4	-	3,4
Provence-Alpes-Côte d'Azur	6,4	5,5	11,9	12,0	-	12,0
Rhône-Alpes	8,1	7,1	15,2	0,0	139,0	139,0
Total	75,9	66,0	141,9	72,9	224,4	297,3

Table 6 - Comparaison entre les batteries des VE et les capacités optimales des stockages de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) (GWh)

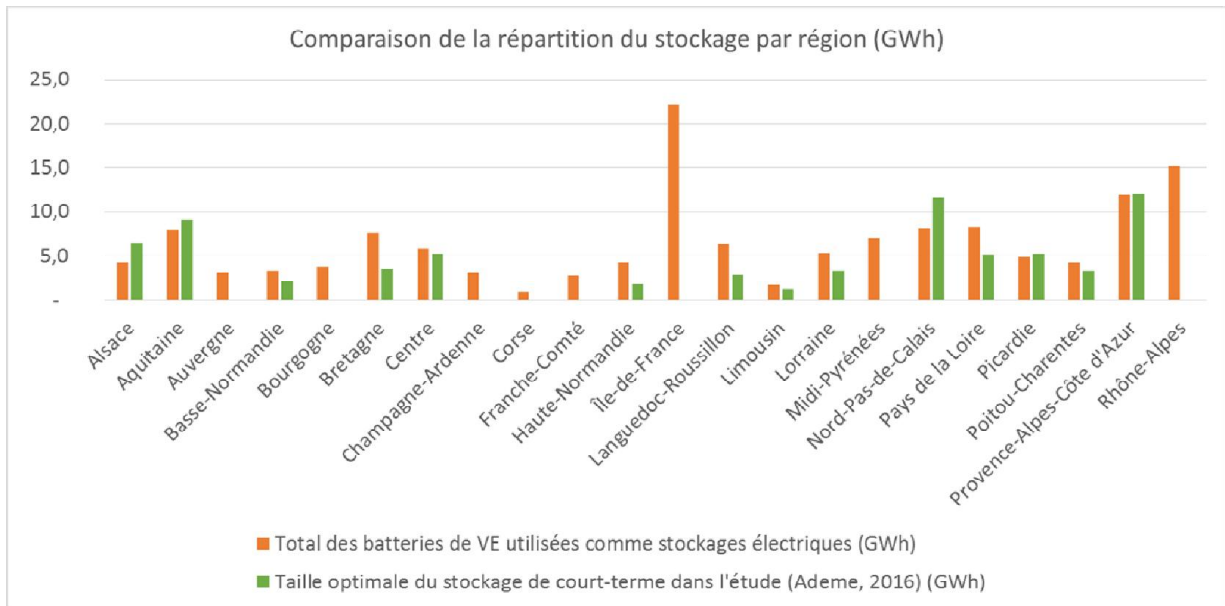


Figure 9 - Comparaison entre les batteries des VE et les capacités optimales des stockages de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) (GWh)

		Total de batteries standards (GW)	Total de batteries longue-distance (GW)	Total des batteries de VE utilisées comme stockages électriques (GW)	Taille optimale du stockage de court-terme dans l'étude (Ademe, 2016) (GW)	Taille optimale du stockage hebdomadaire dans l'étude (Ademe, 2016) (GW)	Taille optimale du stockage de court- et moyen-terme dans l'étude (Ademe, 2016) (GW)
Alsace	3,0%	1,1	0,2	1,3	1,1	-	0,3
Aquitaine	5,6%	2,0	0,4	2,4	1,5	-	0,2
Auvergne	2,2%	0,8	0,2	1,0	0,0	-	0,0
Basse-Normandie	2,3%	0,8	0,2	1,0	0,4	-	0,0
Bourgogne	2,6%	0,9	0,2	1,1	0,0	-	0,0
Bretagne	5,3%	1,9	0,4	2,3	0,6	0,0	2,1
Centre	4,1%	1,5	0,3	1,8	0,9	-	0,0
Champagne-Ardenne	2,2%	0,8	0,2	0,9	0,0	1,2	0,0
Corse	0,6%	0,2	0,0	0,3	-	-	-
Franche-Comté	2,0%	0,7	0,2	0,9	0,0	-	0,0
Haute-Normandie	3,0%	1,1	0,2	1,3	0,3	-	0,0
Île-de-France	15,6%	5,5	1,2	6,7	0,0	-	8,1
Languedoc-Roussillon	4,5%	1,6	0,3	1,9	0,5	-	0,0
Limousin	1,2%	0,4	0,1	0,5	0,2	-	0,0
Lorraine	3,8%	1,3	0,3	1,6	0,6	-	0,7
Midi-Pyrénées	4,9%	1,7	0,4	2,1	0,0	1,5	0,0
Nord-Pas-de-Calais	5,8%	2,0	0,4	2,5	1,9	-	3,1
Pays de la Loire	5,8%	2,1	0,4	2,5	0,9	-	2,0
Picardie	3,4%	1,2	0,3	1,5	0,9	-	0,0
Poitou-Charentes	3,0%	1,1	0,2	1,3	0,6	-	0,1
Provence-Alpes-Côte d'Azur	8,4%	3,0	0,6	3,6	2,0	-	0,0
Rhône-Alpes	10,7%	3,8	0,8	4,6	0,0	4,3	0,0
Total	100,0%	35,4	7,7	43,1	12,2	7,0	16,8

Table 7 - Comparaison entre les batteries des VE et les capacités optimales des stockages de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) (GW)

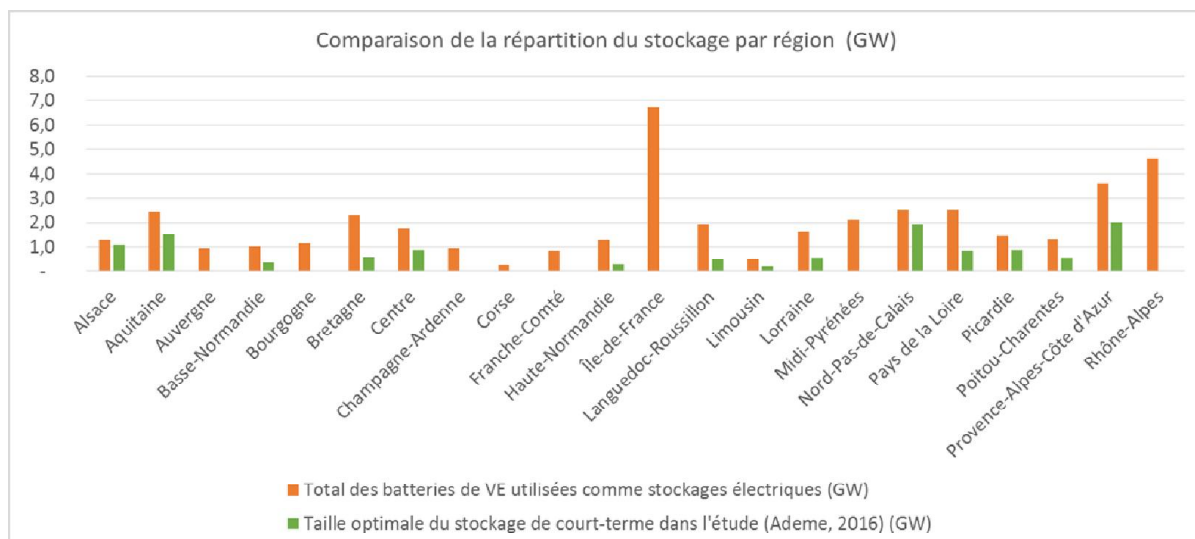


Figure 10 - Comparaison entre les batteries des VE et les capacités optimales des stockages de l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016)(GW)

5.2.2 Consommation électrique et consommation de carburant

5.2.2.1 Consommation annuelle issue de la distance annuelle parcourue

La consommation annuelle par véhicule est basée sur les hypothèses suivantes :

- Distance annuelle parcourue : 432 Mds km/an, dont 21% dans des déplacements longues-distances (trajets de plus de 80 km depuis le domicile selon la définition des déplacements longues-distances du (Commissariat Général au Développement Durable, 2010))⁴¹
 - Distance annuelle parcourue actuelle : 500 Mds de km/an⁴²
 - En 2050, baisse de 13% de la distance annuelle parcourue par rapport à la distance actuelle⁴³
 - 344 Mds de km/an de déplacements courtes-distances, 91 Mds de km/an de déplacements longues-distances
- Statistiques sur les trajets et distribution des distances parcourues :
 - Les déplacements quotidiens des véhicules hybrides sont supposés être réalisés en mode électrique
 - 25% des déplacements longues-distances comptent moins de 200 km⁴⁴ (La Figure 11 présente le pourcentage des kilomètres parcourus en fonction de la distance maximum du déplacement)
 - On suppose que les VE standards ne sont pas utilisés pour les déplacements longues-distances de plus de 200 km

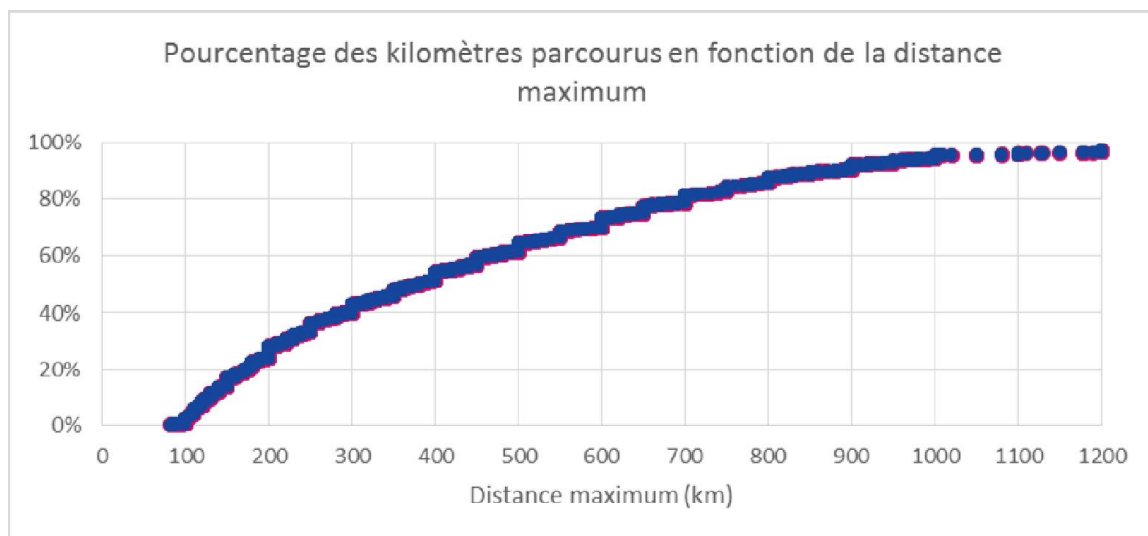


Figure 11 – Pourcentage de la distance parcourue en fonction de la distance maximum

- On suppose que les 100 premiers kilomètres des déplacements longue distance des véhicules hybrides sont parcourus en mode électrique

⁴¹ Source : (Commissariat Général au Développement Durable, 2010), données analysées par Renault

⁴² Source : (Commissariat Général au Développement Durable, 2014)

⁴³ Source : (ADEME, 2013)

⁴⁴ Source : (Commissariat Général au Développement Durable, 2010), données analysées par Renault

- Ces 100 premiers kilomètres correspondent à 36% du kilométrage parcouru en déplacement longue distance⁴⁵

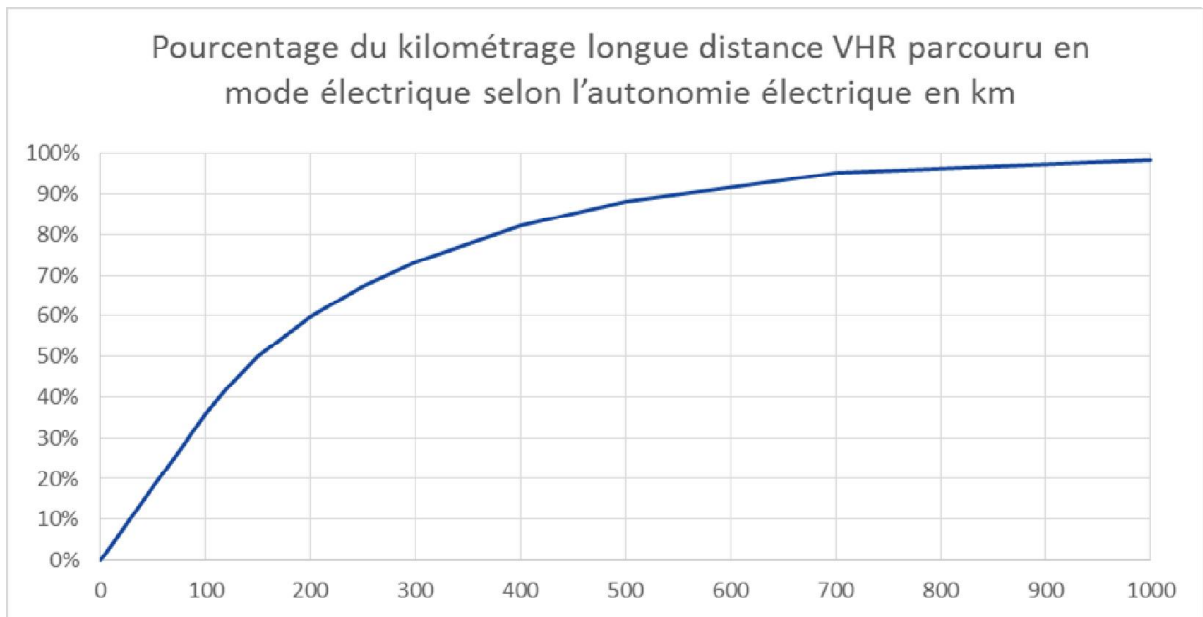


Figure 12 – Pourcentage du kilométrage longue distance VHR parcouru en mode électrique selon l'autonomie électrique en km

- La consommation des véhicules est supposée être égale à :
 - 22 kWh/100km pour les trajets longues-distances
 - 12.5 kWh/100km pour les trajets courtes-distances
- Le rendement des moteurs thermiques est de 0,35

La répartition du parc (5.2.1) et les hypothèses décrites ci-dessus permettent de calculer la consommation annuelle par type de VE et par type de trajet.

5.2.2.2 Profils de consommation journaliers

5.2.2.2.1 Trajets longues distances

Le profil de consommation journalier des véhicules longue-distances est déduit des statistiques de présence journalière au domicile ⁴⁶. Les données de l'année 2015 ont été extrapolées pour 2011-2012 en prenant en compte les vacances scolaires, les jours fériés et les ponts. Chaque variation d'un jour à l'autre du taux de présence au domicile est considérée comme un trajet longue distance. La Figure 13 présente le profil résultant.

⁴⁵Source : (Commissariat Général au Développement Durable, 2010), données analysées par Renault

⁴⁶ Projection à 2011-2012 des données 2005 extraites de (Ministère du Tourisme, 2005).

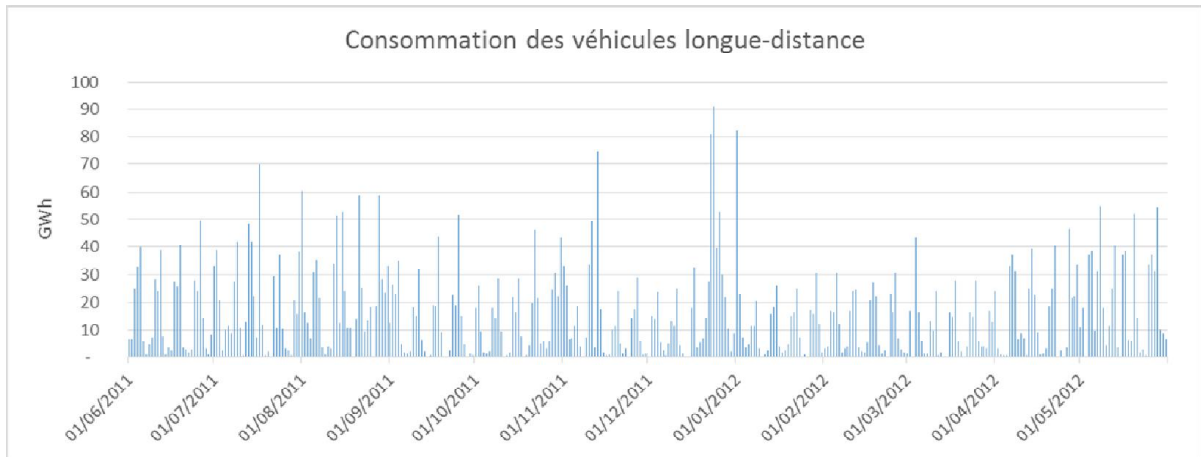


Figure 13 – Profil de consommation des trajets longue-distance

5.2.2.2.2 Trajets quotidiens

Le profil de consommation journalier des trajets quotidiens est déduit de la répartition hebdomadaire des trajets ⁴⁷ (Figure 14) en prenant en compte les jours fériés et les vacances ⁴⁸. Le profil résultant est présenté Figure 15.

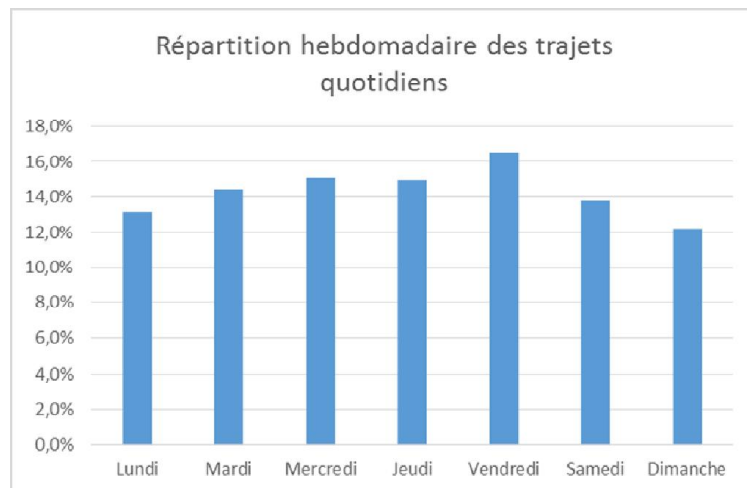


Figure 14 – Distribution par jour de semaine des trajets quotidiens

⁴⁷ D’après (Commissariat Général au Développement Durable, 2010).

⁴⁸ Les distances augmentent de 1 à 3% pendant les vacances scolaires (selon le nombre de région en vacances au même moment), sinon, les distances diminuent de 1% par rapport à la moyenne annuelle.

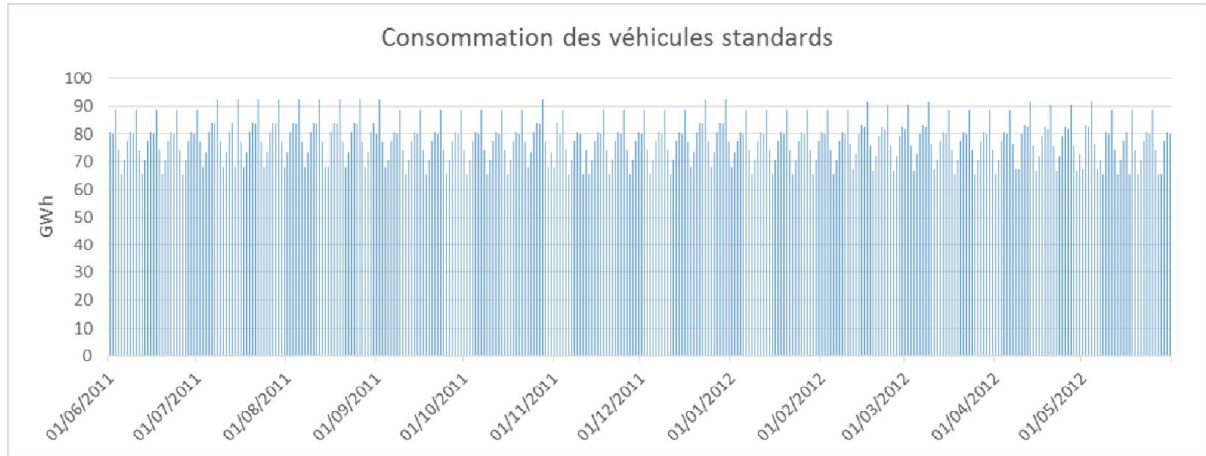


Figure 15 – Profil de consommation journalier des trajets quotidiens

5.2.3 Profil de présence à la borne de recharge

Il est essentiel de définir un profil de présence aux bornes de recharge selon l’heure de la journée et le jour de la semaine, les VE ne pouvant se recharger uniquement quand ils sont connectés au réseau électrique. Considérons plusieurs profils de présence associés à plusieurs comportements (véhicules utilisés pour aller au travail ou non, borne de recharge présente au domicile...). Les statistiques de stationnement fournies par le (Commissariat Général au Développement Durable, 2010)⁴⁹, illustrées par la Figure 16, permettent de construire ces profils de présence aux bornes, selon la présence ou non d’une borne de recharge au travail ou au domicile (Figure 17).

Les figures ci-dessous illustrent ainsi que les véhicules du parc automobile sont stationnés 95% du temps, y compris en journée, ce qui les rend potentiellement disponibles pour les services énergétiques.

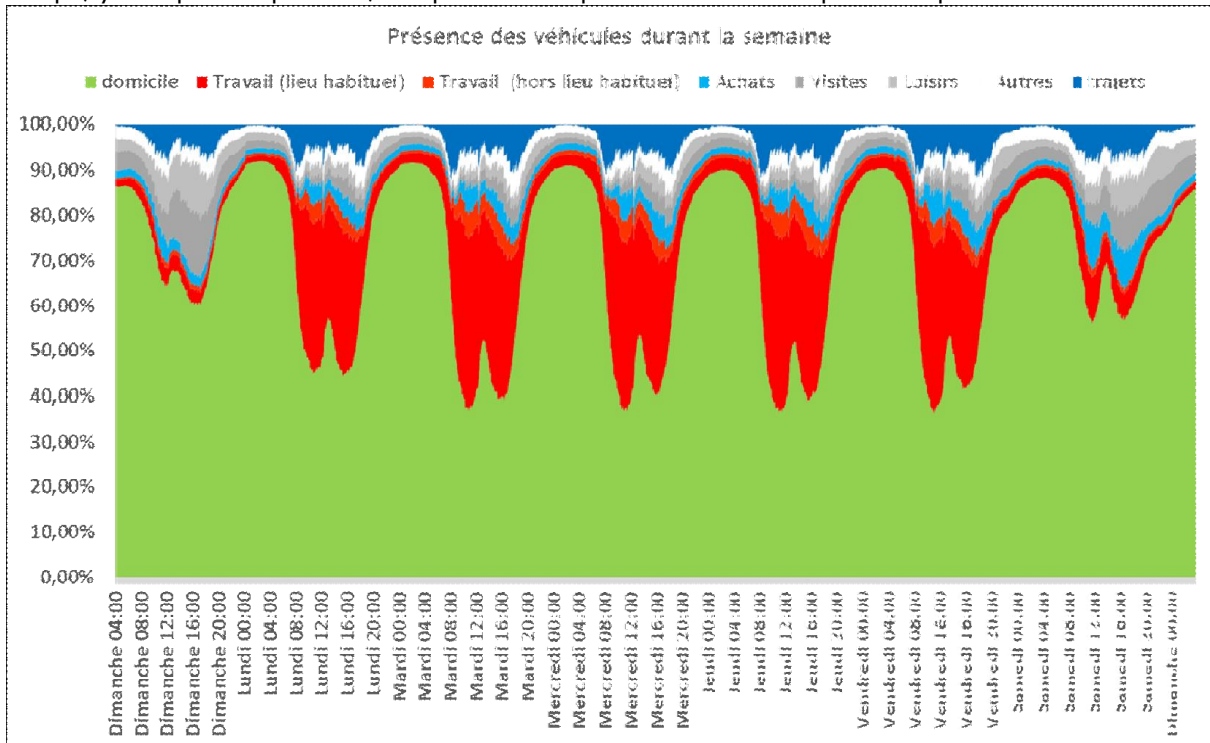
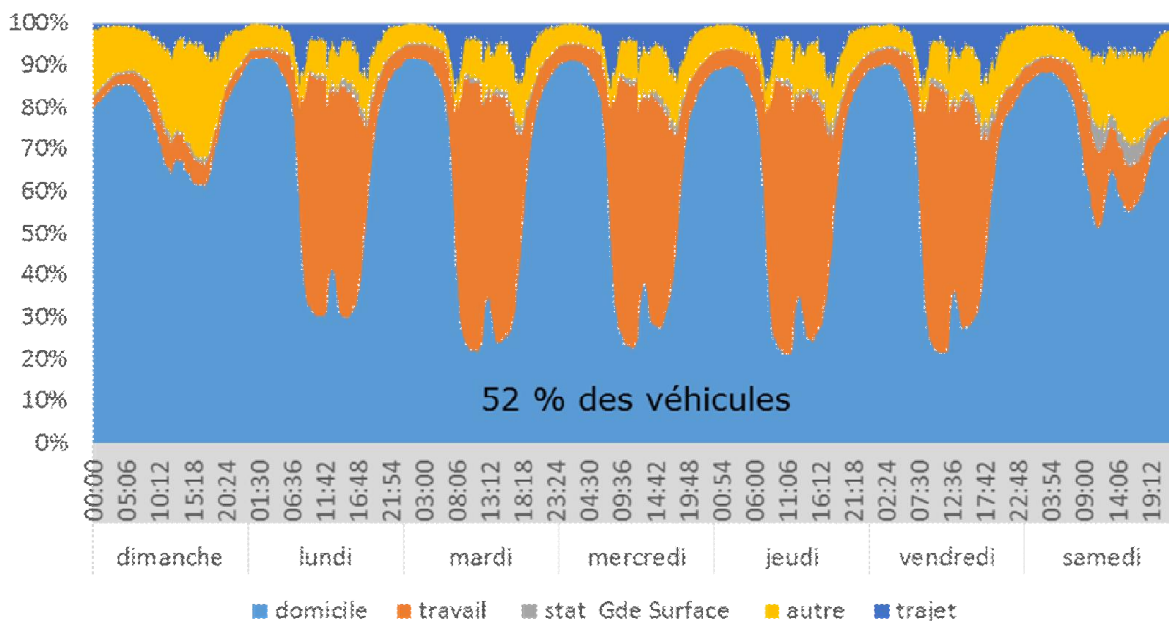


Figure 16 – Heures de présence des véhicules

⁴⁹ p 120

Positionnement des véhicules utilisés pour se rendre au travail



Positionnement des véhicules non utilisés pour se rendre au travail

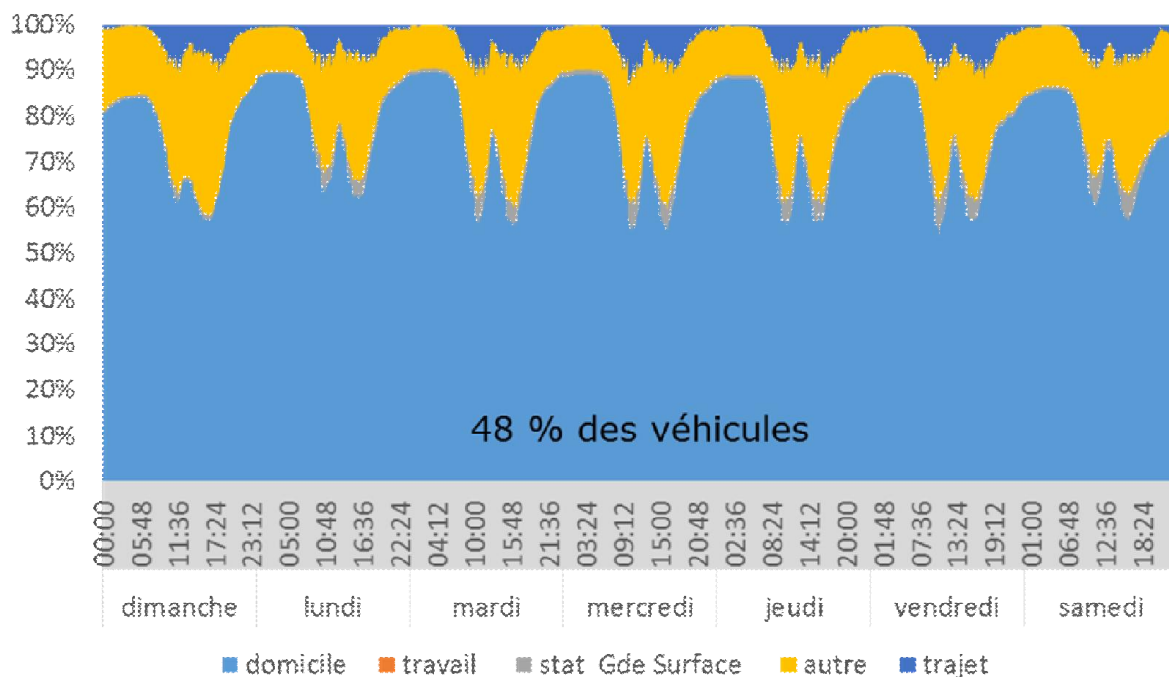


Figure 17 - Positionnement des véhicules pendant la semaine, en fonction de leur usage

5.2.3.1 Les comportements types des conducteurs

Les comportements des conducteurs sont groupés en trois catégories ⁵⁰. Les profils horaires de présence sont calculés en exploitant la base de données des trajets ⁵¹, à partir de l'heure de fin du dernier trajet de retour au domicile ou au travail et de l'heure de départ du trajet suivant.

5.2.3.1.1 Le profil faiblement contraint

Le profil « faiblement contraint » (82 % des VE et VHR) correspond au cumul :

- des véhicules non utilisés pour aller au travail et disposant d'une borne au domicile (42 % des VE et VHR),
- des véhicules utilisés pour aller au travail et disposant d'une borne de recharge au travail et au domicile (40 % des VE et VHR).

Les véhicules de cette catégorie sont connectés à une borne de recharge la majorité du temps, comme cela est illustré par la Figure 18.

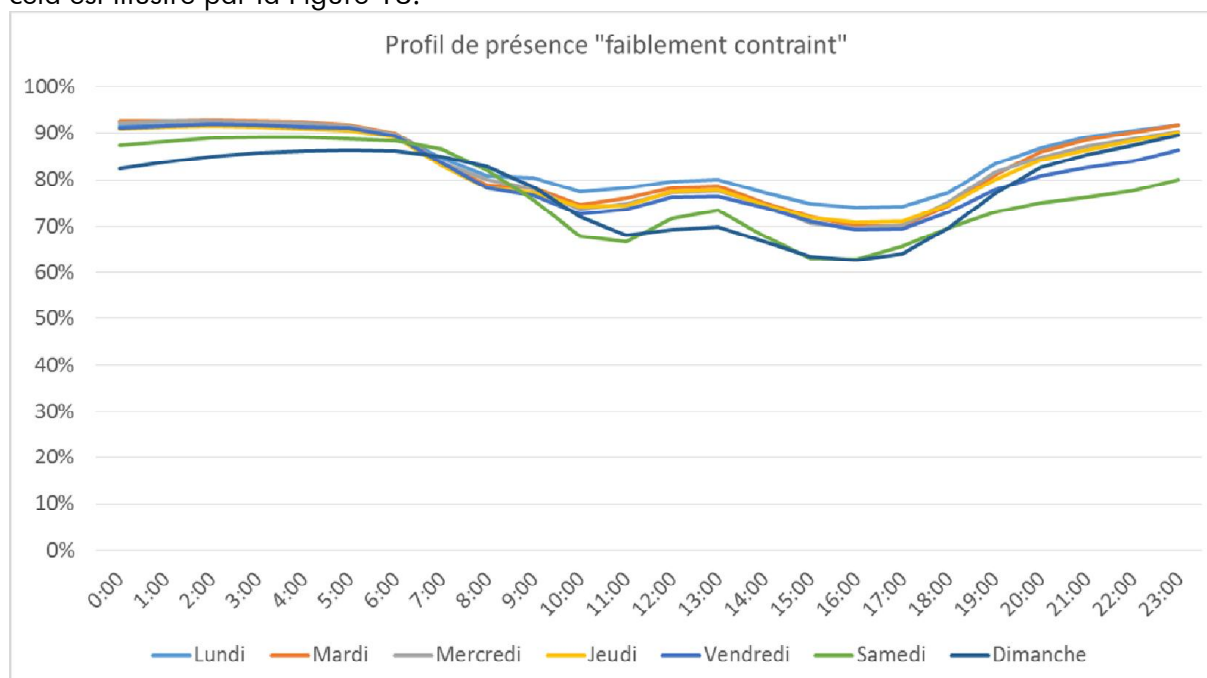


Figure 18 – Profil de présence horaire faiblement contraint selon le jour de la semaine

5.2.3.1.2 Le profil « charge de jour »

Le profil « charge de jour » correspond au consommateur qui dispose d'une borne de recharge uniquement au travail et utilise son véhicule pour aller au travail ⁵². La recharge d'un véhicule d'un tel consommateur ne peut se faire qu'en journée.

La Figure 19 montre que les véhicules de cette catégorie ne peuvent pas se recharger le week-end ⁵³. Ce profil correspond à 13% des conducteurs de VE.

⁵⁰ On suppose qu'un consommateur ne disposant d'une borne ni au domicile, ni au travail possède un véhicule thermique.

⁵¹ D'après (Commissariat Général au Développement Durable, 2010)

⁵² Les conducteurs qui travaillent la nuit ou le week-end et qui n'ont pas de stationnement privé au travail et au domicile ont été reportés sur les profils « faiblement contraint » ou « thermique ». Ces conducteurs ne représentent que 3,1% du nombre total de conducteurs.

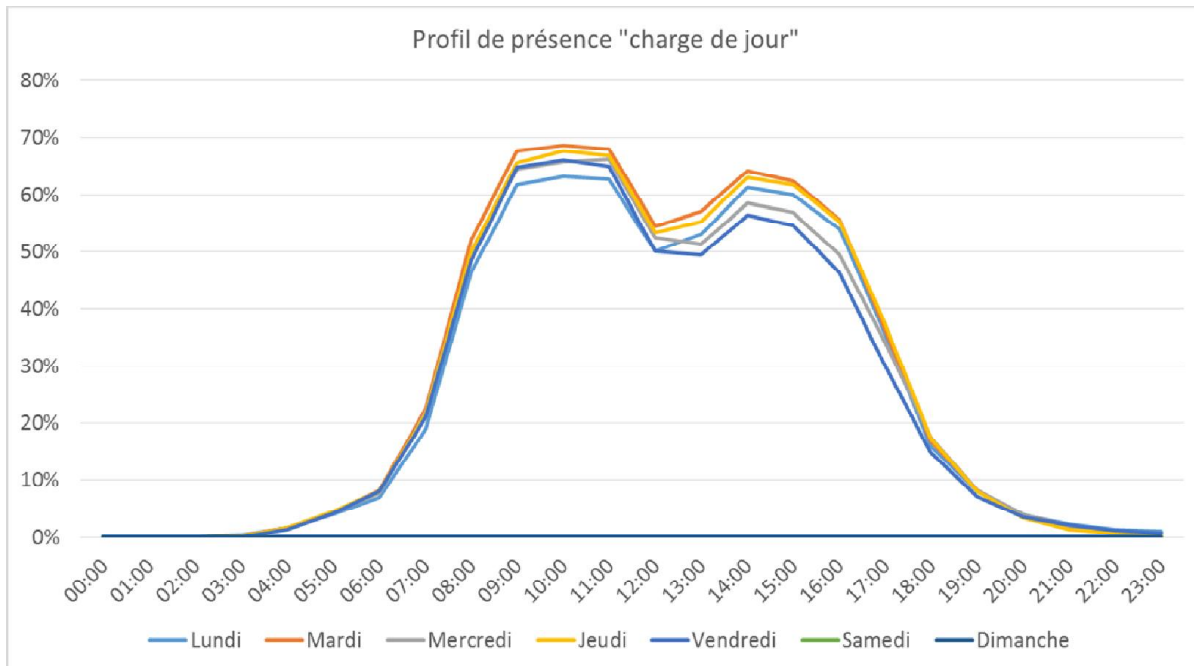


Figure 19 – Le profil de présence horaire pour la catégorie charge de jour, selon le jour de la semaine

5.2.3.1.3 Le profil charge de nuit

Le profil « charge de nuit » correspond aux conducteurs qui disposent d’une borne de recharge au domicile et utilisent leurs véhicules pour aller au travail.

Les véhicules de cette catégorie sont connectés à une borne de recharge surtout la nuit, sauf le week-end comme montré dans la figure 16. Cette catégorie représente 5% des conducteurs.

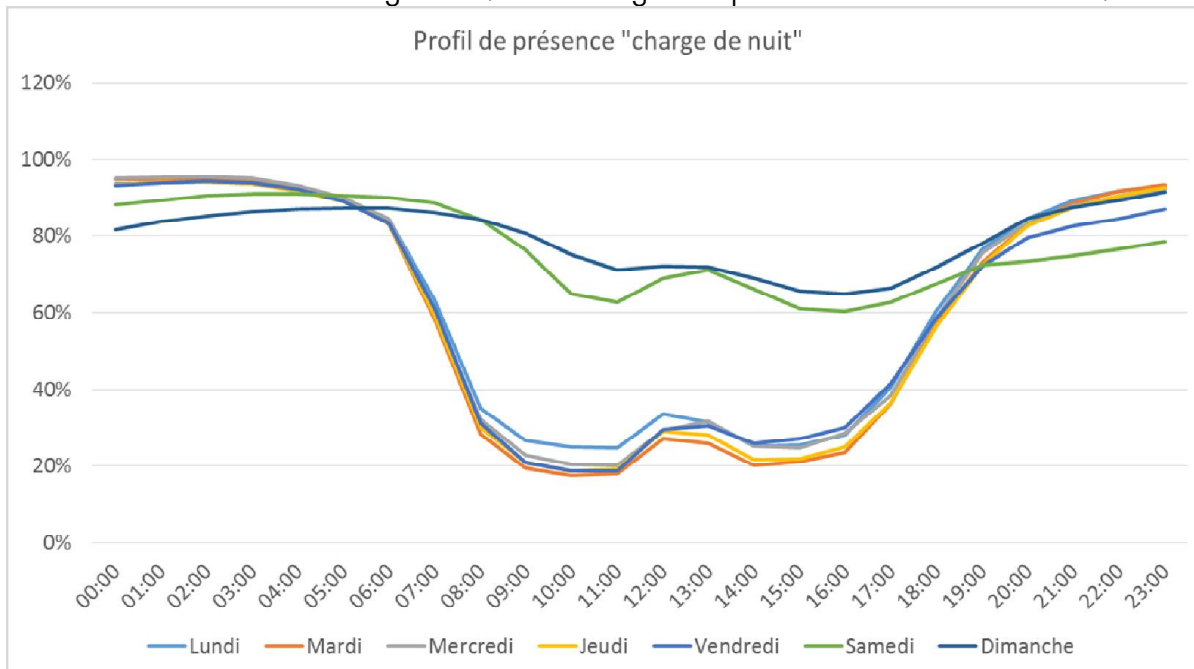


Figure 20 - Le profil de présence horaire pour la catégorie charge de nuit, selon le jour de la semaine

⁵³ La consommation électrique du week-end est reportée avant le mardi 6h au même moment que la consommation du lundi. La possibilité de se charger le samedi (au supermarché par exemple) n’a pas été prise en compte.

5.2.3.2 Autres paramètres du profil de présence aux bornes de recharge

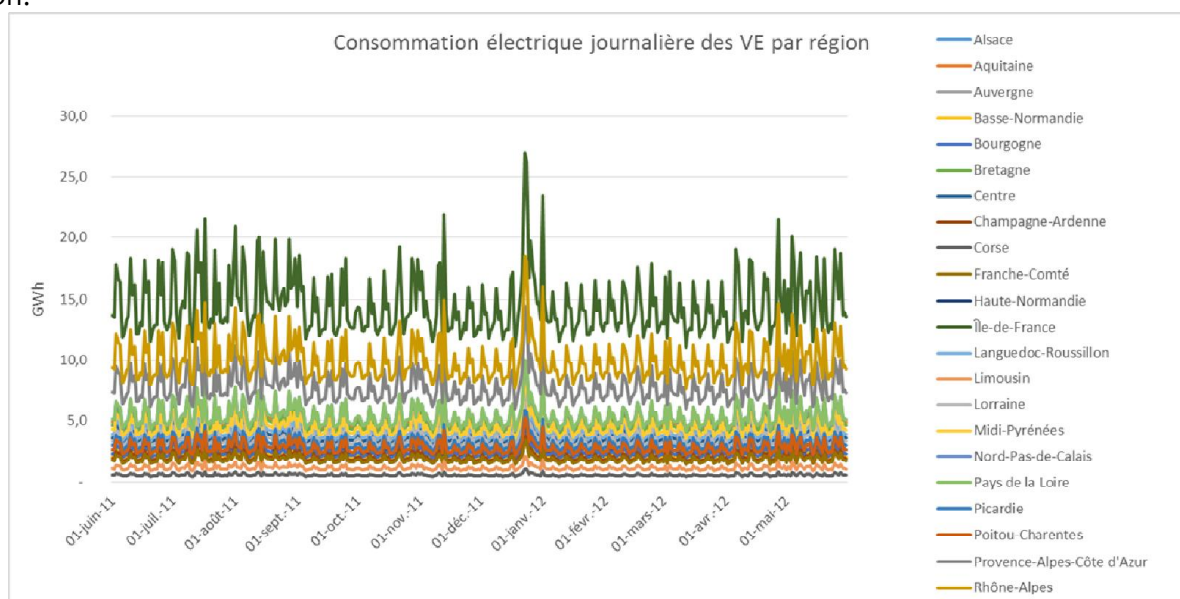
Le taux d'absence du domicile (mentionné au 5.2.2.2.1) permet de déduire une disponibilité journalière qui est appliquée aux différentes catégories de profils ⁵⁴.

De plus, un coefficient d'acceptabilité sociale est pris en compte. On suppose pour chaque heure de l'année que seulement 80% des véhicules présents à une borne de charge sont à disposition du système électrique.

5.2.3.3 Données régionales

5.2.3.3.1 Consommation journalière pour chaque région

La distribution régionale des VE, la consommation annuelle et les profils journaliers associés aux trajets courtes et longues distances permettent de déduire la consommation électrique journalière des VE par région.



5.2.3.3.2 Distribution des véhicules électriques par région

La Table 8 fournit la répartition des véhicules électriques et la consommation associée par région.

⁵⁴ Les profils de comportement définis par région (du paragraphe 3.1) sont multipliés par le taux de présence au domicile.

	Consommation annuelle des VE (TWh)	Nombre de VHR (M)	Nombre de VE standards (M)	Nombre de VE longue-distance (M)
Alsace	1,0	0,3	0,2	0,0
Aquitaine	1,9	0,5	0,3	0,1
Auvergne	0,8	0,2	0,1	0,0
BasseNormandie	0,8	0,2	0,1	0,0
Bourgogne	0,9	0,2	0,1	0,0
Bretagne	1,8	0,4	0,3	0,1
Centre	1,4	0,3	0,2	0,0
ChampagneArdenne	0,7	0,2	0,1	0,0
FrancheComte	0,7	0,2	0,1	0,0
HauteNormandie	1,0	0,3	0,2	0,0
IleDeFrance	5,3	1,3	0,8	0,2
LanguedocRoussillon	1,5	0,4	0,2	0,0
Limousin	0,4	0,1	0,1	0,0
Lorraine	1,3	0,3	0,2	0,0
MidiPyrenees	1,7	0,4	0,2	0,1
NordPasDeCalais	2,0	0,5	0,3	0,1
PaysDeLaLoire	2,0	0,5	0,3	0,1
Picardie	1,2	0,3	0,2	0,0
PoitouCharentes	1,0	0,3	0,2	0,0
ProvenceAlpesCoteDAzu	2,9	0,7	0,4	0,1
RhoneAlpes	3,6	0,9	0,5	0,1
Total	34	8	5	1

Table 8 – Répartition des VE par région

5.2.4 Précisions sur les différences d’hypothèses avec l’étude Ademe 2050

La plupart des hypothèses de l’étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) ont également été retenues dans la présente étude. Certaines hypothèses relatives aux véhicules électriques ont cependant été affinées, cette étude se focalisant principalement sur les véhicules électriques et leur capacité à rendre service au système électrique.

Les hypothèses qui diffèrent de l’étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) sont les suivantes :

- | Puisque la présente étude spécifie différents types de véhicules électriques, associés à des profils de consommation spécifiques, les profils de consommation journaliers ont été mis à jour.
 - La consommation annuelle totale des VE passe de 31 TWh dans l’étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) à 34 TWh.
- | L’utilisation de données de constructeurs automobiles a permis d’affiner la distribution régionale des VE dans la présente étude (au lieu d’utiliser une répartition au prorata de

statistiques démographiques). La différence principale entre les deux hypothèses de répartition est le nombre de VE de la région Ile de France (qui a pu être surestimé du fait d'une population importante dans cette région). Cette diminution est compensée par une augmentation significative du nombre de VE en région Rhône-Alpes.

- | La totalité du parc de véhicules est supposée pilotable pour la recharge, contre la moitié dans l'étude (ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016). Un parc de véhicules entièrement pilotables est en effet une hypothèse cohérente avec celle de l'utilisation des batteries des VE comme stockages pour le système électrique.
 - A l'avenant, le modèle et les contraintes associées à la recharge des VE sont plus flexibles dans la présente étude.

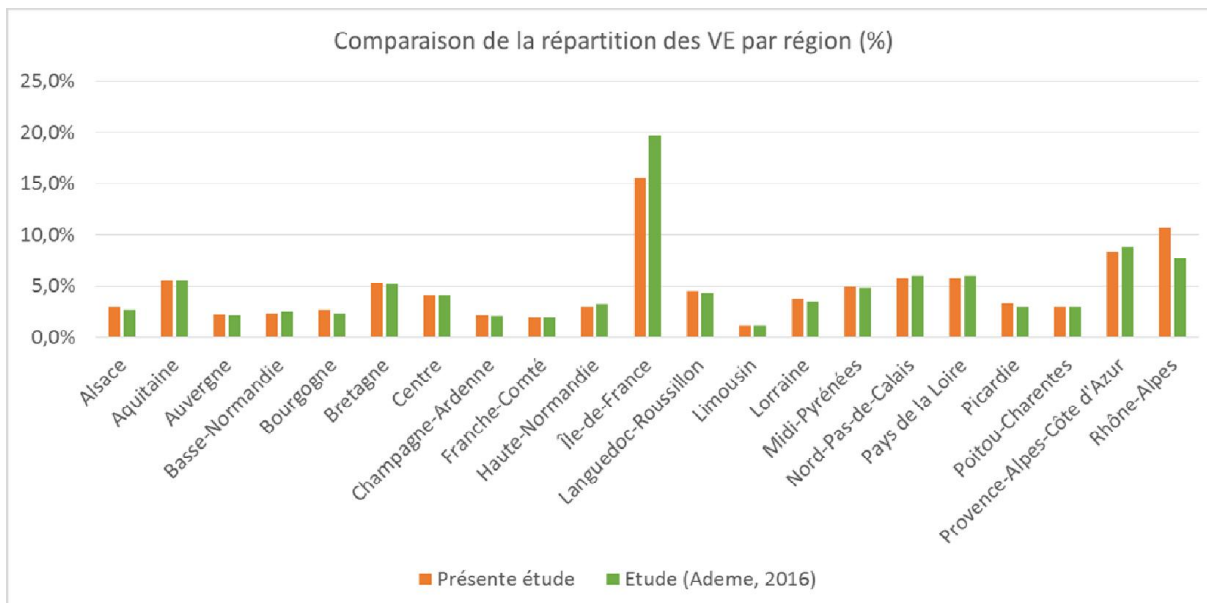


Figure 22 – Répartition des VE par région : comparaison entre l'étude actuelle et l'étude Ademe

5.2.5 Modèle d'optimisation

La modélisation adoptée dans l'étude représente, pour les régions françaises et les pays qui leur sont frontaliers, les modalités de fonctionnement et les coûts (coûts d'investissement, coûts opérationnels et coûts de maintenance) de l'ensemble des filières de production et de stockage d'électricité, ainsi que des procédés de pilotage de demande électrique et des échanges commerciaux d'électricité entre les zones considérées.

La fonction objectif minimisée correspond à la somme des investissements et du coût de production sur toute l'année :

$$F_{obj}(P, P_{max}, capaMax) = \sum_{\text{filières } f, \text{ régions } r} CoûtInstallation(f) * P_{max}(f, r) + \sum_{\text{frontières } fr} CoûtRéseau * capaMax(fr) + \sum_{\text{filières } f, \text{ régions } r, \text{ heures } h} CoûtProduction(f) * P(f, h, r)$$

Les variables du problème sont alors :

- | les puissances installées de production et stockage de chaque filière dans chaque région $P_{max}(f, r)$,

- | les capacités des lignes interrégionales à chaque frontière $capaMax(fr)$,
- | les productions de chaque filière, dans chaque région, à chaque heure de l'année : $P(f, h, r)$,
- | le pilotage de la demande.

Les contraintes modélisées sont les suivantes :

- | contrainte d'équilibre offre-demande,
- | contrainte d'indépendance énergétique annuelle globale de la France
- | contrainte de flux d'électricité entre les régions borné, à chaque heure, par $capaMax(fr)$,
- | contrainte de production maximale à chaque instant, dans chaque région, pour chaque filière : $P(f, h, r) \leq Pmax(f, r)$,
- | contraintes techniques associées à chaque filière (compétitivité entre les filières éoliennes onshore, rendements, stockages, productions intermittentes, équilibrage entre production et consommation de gaz de synthèse, etc.),
- | contraintes techniques associées à la flexibilité.

Le problème résultant comporte de l'ordre de 15 millions de variables et 20 millions de contraintes. Sa résolution fait appel à un algorithme développé au sein du moteur de calcul *Artelys Optimization Engine*, qui s'appuie sur le solveur d'optimisation *Xpress*.

Bibliographie

ADEME. (2013). *Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050.*

ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN. (2016). *Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations.*

ADEME, Artelys, ATEE, ENEA Consulting. (2013). *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies.*

Commissariat Général au Développement Durable. (2014). *Parc des véhicules au 1er janvier 2014.*

Commissariat Général au Développement Durable. (2010). *La mobilité des Français - Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. La revue du CGDD.*

Ministère du Tourisme. (2005). *Mobilité touristique et population présente.*

RTE. (2014). *Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France.*

Table des figures

FIGURE 1 - IMPACT DES BATTERIES DES VE SUR LE MIX ELECTRIQUE (GW)	11
FIGURE 2 - IMPACT DES BATTERIES DES VE SUR LE MIX ELECTRIQUE (TWH)	12
FIGURE 3 - IMPACT DES BATTERIES DES VE SUR LE MIX ELECTRIQUE (GW), CALCULS AVEC CONTRAINTES D'ACCEPTABILITE	14
FIGURE 4 – ILLUSTRATION : PROFILS DE RECHARGE DES VEHICULES FAIBLEMENT CONTRAINTS	16
FIGURE 5 – ILLUSTRATION : PROFILS DE STOCKAGE ET DESTOCKAGE DES BATTERIES DES VE « FAIBLEMENT CONTRAINTS »	17
FIGURE 6 - ILLUSTRATION : PROFILS D'INJECTION ET SOUTIRAGE SUR LE RESEAU DES BATTERIES DES VE « FAIBLEMENT CONTRAINTS »	17
FIGURE 7 - ILLUSTRATION : UTILISATION SAISONNIERE DES BATTERIES DES VE « FAIBLEMENT CONTRAINTS » COMME STOCKAGES	18
FIGURE 8 – DISTRIBUTION REGIONALE DES VEHICULES (%)	21
FIGURE 9 - COMPARAISON ENTRE LES BATTERIES DES VE ET LES CAPACITES OPTIMALES DES STOCKAGES DE L'ETUDE (ADEME, ARTELYS, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) (GWH)	23
FIGURE 10 - COMPARAISON ENTRE LES BATTERIES DES VE ET LES CAPACITES OPTIMALES DES STOCKAGES DE L'ETUDE (ADEME, ARTELYS, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016)(GW)	24
FIGURE 11 – POURCENTAGE DE LA DISTANCE PARCOURUE EN FONCTION DE LA DISTANCE MAXIMUM	25
FIGURE 12 – POURCENTAGE DU KILOMETRAGE LONGUE DISTANCE VHR PARCOURU EN MODE ELECTRIQUE SELON L'AUTONOMIE ELECTRIQUE EN KM	26
FIGURE 13 – PROFIL DE CONSOMMATION DES TRAJETS LONGUE-DISTANCE	27
FIGURE 14 – DISTRIBUTION PAR JOUR DE SEMAINE DES TRAJETS QUOTIDIENS	27
FIGURE 15 – PROFIL DE CONSOMMATION JOURNALIER DES TRAJETS QUOTIDIENS	28
FIGURE 16 – HEURES DE PRESENCE DES VEHICULES	28
FIGURE 17 - POSITIONNEMENT DES VEHICULES PENDANT LA SEMAINE, EN FONCTION DE LEUR USAGE	29
FIGURE 18 – PROFIL DE PRESENCE HORAIRE FAIBLEMENT CONTRAINT SELON LE JOUR DE LA SEMAINE	30
FIGURE 19 – LE PROFIL DE PRESENCE HORAIRE POUR LA CATEGORIE CHARGE DE JOUR, SELON LE JOUR DE LA SEMAINE	31
FIGURE 20 - LE PROFIL DE PRESENCE HORAIRE POUR LA CATEGORIE CHARGE DE NUIT, SELON LE JOUR DE LA SEMAINE	31
FIGURE 21 – CONSOMMATION JOURNALIERE ELECTRIQUE DES VE PAR REGION	32
FIGURE 22 – REPARTITION DES VE PAR REGION : COMPARAISON ENTRE L'ETUDE ACTUELLE ET L'ETUDE ADEME	34

Table des tableaux

TABLE 1 – CONSOMMATION JOURNALIERE DES VEHICULES	7
TABLE 2 - IMPACT DES BATTERIES DES VE SUR LE STOCKAGE ELECTRIQUES	13
TABLE 3 - FORMALISATION DES CONTRAINTES D'ACCEPTABILITE	14
TABLE 4 - IMPACT DES BATTERIES DES VE SUR LE STOCKAGE ELECTRIQUE, AVEC CONTRAINTES D'ACCEPTABILITE	15
TABLE 5 - IMPACT ECONOMIQUE DES BATTERIES DES VE, REPARTITION PAR POSTE DE COUTS	15
TABLE 6 - COMPARAISON ENTRE LES BATTERIES DES VE ET LES CAPACITES OPTIMALES DES STOCKAGES DE L'ETUDE (ADEME, ARTELYS, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) (GWH)	22
TABLE 7 - COMPARAISON ENTRE LES BATTERIES DES VE ET LES CAPACITES OPTIMALES DES STOCKAGES DE L'ETUDE (ADEME, ARTELYS, ARMINES-PERSEE, ENERGIES DEMAIN, 2016) (GW)	24
TABLE 8 – REPARTITION DES VE PAR REGION	33