



LOUVAIN
School of Management

UNIVERSITE CATHOLIQUE DE LOUVAIN
LOUVAIN SCHOOL OF MANAGEMENT

**Impact du développement du parc automobile électrique
sur les réseaux électriques belges, pour la recharge dans
le secteur résidentiel**

Promoteur : **Prof. Emanuel De Jaeger**

Co-Promoteur : **Prof. Bruno Colmant**

Mémoire-recherche présenté par
Louis Rion

en vue de l'obtention du titre de
Master 120 crédits en ingénieur de gestion

ANNEE ACADEMIQUE 2015-2016

«La meilleure façon d'anticiper l'avenir est de bien comprendre le présent. »

Peter F. Drucker

Avant toutes choses, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont, de par leur collaboration à des degrés divers, permis de contribuer à l'élaboration de cet ouvrage, symbole de l'aboutissement de mes années d'études universitaires.

Tout d'abord, le Professeur Emmanuel De Jaeger qui, du fait de son expérience, notamment dans le domaine de l'électricité, m'a guidé par ses conseils toujours efficaces et son enthousiasme communicatif. Je le remercie de m'avoir orienté de manière judicieuse lorsque des zones de doutes apparaissaient. Du fait de nos nombreux échanges clairs et détaillés, le Professeur De Jaeger m'a permis de comprendre plus en profondeur les enjeux liés à ma thématique de recherche. Merci également pour la patience dont il a fait preuve tout au long de mon travail.

Je remercie également le Professeur Bruno Colmant qui a veillé à certains aspects plus techniques et au bon déroulement de cet ouvrage. Merci à lui pour son soutien, ses conseils précieux toujours avisés et ses prospectives nourrissantes.

Un grand merci aux nombreuses personnes de contact que j'ai pu rencontrer afin d'obtenir les informations nécessaires à la réalisation de ce travail. Je les remercie particulièrement pour le temps qu'elles m'ont consacré ainsi que pour leurs multiples explications, à chaque fois formulées de manière enthousiaste. Tout particulièrement merci à l'équipe d'ORES qui m'a permis d'obtenir les informations dont j'avais besoin pour réaliser mon étude.

Enfin, un énorme merci à ma famille pour son soutien pas uniquement lors de la réalisation de ce travail mais aussi durant toutes mes années d'études. Pour l'accomplissement de ce travail, je tiens à remercier plus particulièrement mon père. De par nos multiples discussions traitant de la thématique abordée dans cet ouvrage, il m'a donné plus que l'envie et la motivation de réaliser ce travail. Merci également à lui pour ses nombreux conseils ainsi que les précieux contacts qu'il a pu me procurer.

Table des matières

Liste des abréviations	
1. Introduction.....	1
2. Le Véhicule Électrique.....	3
2.1. Les différents types de véhicules électrifiés	3
2.2. L'état actuel du marché belge	6
2.3. Le marché de demain.....	10
2.4. Les batteries.....	12
2.5. Les bornes de recharge.....	15
2.6. Les modes de recharge.....	18
3. Les automobilistes.....	20
4. Le système électrique belge	23
4.1. Production	24
4.2. Transport.....	28
4.3. Distribution.....	30
4.4. Fourniture et Consommation.....	31
4.5. Régulation.....	31
5. Proposition de modélisation de la recharge d'une flotte de VE	33
5.1. Profils des automobilistes et habitudes de roulage.....	36
5.2. Modélisation du profil de charge.....	43
5.3. Principales limites de la modélisation proposée	47
5.4. Smart Grid : V2G et V2H	49
5.5. Hypothèses.....	51
6. Principaux résultats et analyses.....	55
6.1. Modélisation énergétique.....	56
6.2. Modélisation globale de la charge du réseau de transport	57
6.3. Modélisation de la charge du réseau de distribution.....	60
6.4. Estimation du coût de remplacement éventuel des transformateurs 400 kVA suite à un taux de pénétration du VE donné	69
7. Conclusion	71
Bibliographie	75
Annexes.....	82
Annexe 1 : Statistiques du parc automobile belge	82
Annexe 2 : Illustration d'un socle de prise de type 2	84
Annexe 3 : Flux d'électricité en Belgique en 2015	85
Annexe 4 : Transformateur 250 kVA.....	86

4.1. Plaque signalétique d'un transformateur 250 kVA	86
4.2. Fiche technique d'un transformateur 250 kVA.....	87
Annexe 5 : Exemple d'une courbe de charge.....	88
Annexe 6 : Perspectives d'évolution de la consommation moyenne de carburant et d'électricité par type de voitures.....	89
Annexe 7 : Charge du réseau ELIA pour la période 2007-2015.....	89
Annexe 8 : SLP's	90
8.1. Exemple SLP21 et SLP22	90
8.2. Consommations électriques moyennes par type de SLP considéré.....	90
Annexe 9 : Illustration du modèle	91

Liste des abréviations

VE ¹	Véhicule Electrique
GRD	Gestionnaire de Réseau de Distribution
GRT	Gestionnaire de Réseau de Transport
A	Ampère
V	Volt
kV	Kilovolt
W	Watt
kW	Kilowatt
MW	Mégawatt
GW	Gigawatt
TW	Térawatt
BT	Basse Tension
MT	Moyenne Tension
HT	Haute Tension
Wh	Watt heure
kWh	Kilowatt-heure
MWh	Mégawatt-heure
GWh	Gigawatt-heure
TWh	Térawatt-heure
S.D.	Sans Date
Hz	Hertz
kVa	Kilovoltampère
MVA	Mégavoltampère
PTA	Poste de Transformation Aérien

¹ Dans cet ouvrage, la catégorie VE reprend uniquement les Véhicules Hybrides Rechargeables et les Véhicules 100% électriques.

1. Introduction

Depuis quelques années, le véhicule électrique est de plus en plus à l'ordre du jour. Ses débuts ne datent cependant pas d'aujourd'hui. Le premier prototype aurait vu le jour vers 1830, avec comme créateur Robert Anderson. À la suite d'une multitude de faits, notamment liés aux batteries ainsi qu'à l'avènement de véhicules à moteurs thermiques proposant des performances de plus en plus accrues, les véhicules électriques vont pratiquement devenir obsolètes et disparaître de la circulation dans les années 1920-1930. Ce n'est que dans les années 1990 que ces automobiles vont faire leur réapparition avec, entre autres, un projet de déploiement de véhicules électriques en Californie, et surtout, la commercialisation de la fameuse voiture hybride thermique-électrique proposée par le constructeur japonais Toyota, la Prius (Huault-Dupuy, 2014). Ces derniers événements, en partie couplés au plan climatique de l'Union Européenne (20-20-20) (Commission Européenne, 2016) qui a pour objectif le ralentissement du réchauffement climatique, ainsi qu'à la sensibilisation grandissante des citoyens envers notre environnement, vont pousser la génération actuelle à investir davantage de moyens dans le développement d'alternatives aux véhicules thermiques. Une solution, prometteuse parmi d'autres, concerne l'électromobilité et le déploiement des véhicules électrifiés. Il conviendra néanmoins, afin de rester dans cette optique de contribution à un environnement plus propre, de s'assurer que l'approvisionnement en électricité de ce type de véhicules soit « vert », c'est-à-dire provenant de sources d'énergie renouvelable. Un déploiement accru du VE n'est cependant pas sans conséquence, notamment vis-à-vis des réseaux électriques. La recharge de ces véhicules sur notre territoire risque en effet d'impacter le réseau électrique, et plus particulièrement son infrastructure. Un fameux challenge auquel il faudra faire face dans les années à venir ne concerne pas uniquement l'énergie électrique requise pour alimenter les batteries du parc de VE, mais aussi et surtout les pics de puissance (charge du réseau) pouvant survenir à certains moments de la journée, à des endroits divers. Il s'avère que ces pointes de charge, si elles ne sont pas contrôlées, sont susceptibles de survenir aux moments les plus critiques de la journée et d'ainsi s'ajouter aux pointes de charge déjà générées par d'autres usages, augmentant ainsi la pointe de charge totale du réseau.

Les infrastructures actuelles propres au réseau électrique belge sont-elles prévues pour faire face à ce type challenge ? Ou alors les opérateurs doivent-ils anticiper des investissements futurs afin de les renforcer (et dès lors d'éventuellement voir la facture d'électricité du consommateur augmenter dans les années à venir) ?

Ce présent ouvrage tentera de fournir une estimation de ce que pourrait impliquer la recharge d'un certain nombre de VE en milieu résidentiel. Après avoir effectué un tour d'horizon des principaux aspects des véhicules électrifiés ainsi que de leur rechargement, il décrira de manière globale les principes de fonctionnement du réseau électrique belge. Ensuite, une proposition de modèle sera établie au travers d'une définition des principaux paramètres et hypothèses retenus dans le cadre de la modélisation. Celle-ci fera l'objet du dernier chapitre et aura comme but de fournir des estimations, à l'horizon 2030, de la consommation électrique annuelle propre à une flotte de VE mais aussi de l'impact lié au rechargement, en milieu résidentiel, du parc entier de VE sur le réseau de transport électrique. Par après, l'analyse se portera sur l'impact, au niveau des transformateurs électriques du réseau de distribution, du rechargement d'un nombre restreint de VE pour un quartier résidentiel type en zone rurale et en zone urbaine. Enfin, une estimation du coût de remplacement des transformateurs suite à un certain taux de pénétration du VE sera donnée.

2. Le Véhicule Électrique

De nos jours, il existe sur le marché de plus en plus de véhicules se déplaçant en ayant partiellement ou totalement recours à l'énergie électrique. Parmi ces véhicules, on retrouve les véhicules hybrides et le véhicule électrique pur. Un rapide tour d'horizon de ces types d'automobiles semble utile afin de cerner l'apport du moteur électrique pour chacun des cas.

2.1. Les différents types de véhicules électrifiés

Les véhicules de type hybride utilisent deux sources d'énergie distinctes pour se déplacer. Pour ce faire, deux moteurs travaillent de concert : un moteur thermique nécessitant du carburant (diesel ou essence) ainsi qu'un moteur électrique fonctionnant... à l'électricité fournie par une unité de batteries. Plusieurs types d'hybridation sont possibles en fonction du degré d'importance du système électrique dans la mise en mouvement du véhicule. On distingue quatre types d'hybridation possibles (du plus faible au plus important degré d'hybridation) (Futura-Sciences, s.d.) :

- Micro hybride Start & Stop ;
 - Semi-hybride ;
 - Full hybride ;
 - Hybride rechargeable.
-
- Les véhicules présentant la technologie Start & Stop sont équipés d'un moteur thermique qui sera coupé automatiquement lors des arrêts et se remettra automatiquement en marche lorsque le conducteur relâchera la pression effectuée sur la pédale de freinage (pour un véhicule à boîte automatique) ou appuiera sur la pédale d'embrayage (pour un véhicule à boîte manuelle). Les batteries qui équipent ces micros hybrides Start & Stop sont dès lors supposées disposer de suffisamment d'énergie que pour alimenter le démarreur qui redémarrera le moteur du véhicule avec de nombreuses sollicitations. Ce système permet une économie théorique de carburant de l'ordre de 10% en usage urbain, de 6% en cycle mixte normalisé, et

jusqu'à 16% lorsque la circulation est dense (Observatoire du véhicule d'entreprise [OVE], s.d.).

- Les véhicules semi-hybrides sont quant à eux dotés d'un moteur thermique (généralement sous-dimensionné) et d'un moteur électrique de faible puissance ainsi que d'un système de récupération d'énergie au freinage. Ce système permet un complément de puissance en assistant le moteur thermique dans les phases de bas régime ou lors de fortes accélérations (Notre-planete.info, s.d.). Il n'est cependant pas possible pour les semi-hybrides de se déplacer en ayant uniquement recours au moteur électrique. Ces véhicules sont également équipés du système Start & Stop qui assurera leur démarrage.

- Les véhicules full hybrides, dont la fameuse Toyota Prius en est l'exemple le plus connu, sont équipés d'un moteur thermique (généralement sous-dimensionné) ainsi que d'un moteur électrique suffisamment puissant que pour pouvoir mettre en mouvement l'automobile à lui seul. Dans ce cas, l'électricité est produite soit par le moteur thermique soit lors des phases de freinage (qualifié de freinage régénératif : lorsque le véhicule freine, les roues entraînent le moteur électrique qui fonctionne alors comme un générateur. Cette énergie est créée et stockée dans la batterie) (Futura-Sciences, s.d.). Les économies de carburant pour ce type de véhicule sont bien réelles. Cependant, pour des modèles tels que la Toyota Prius, ces économies ne sont effectives que pour des déplacements en milieux urbains. En effet, le moteur électrique fonctionne lorsque la vitesse de déplacement du véhicule est inférieure à 50 km/h. Au delà de cette vitesse, c'est le moteur thermique qui prend le relais (Fiches-auto, s.d.).

- Enfin les véhicules hybrides rechargeables (VHR ou PHEV en anglais pour « Plug-in Hybrid Vehicle » ou encore une variante nommée EREV pour « Extended Range Electric Vehicle ») se différencient par leur degré d'hybridation qui offre la possibilité de recharger des batteries - de plus grande capacité - qui équipent ces véhicules directement sur le réseau électrique, ou en prélevant soit une partie soit la totalité de la puissance du moteur thermique. Le premier VHR fut développé en 1990 par l'Université de Californie mais c'est dans les années qui suivirent que la production de ce type de véhicule débutera réellement. Les VHR ont la particularité

de pouvoir effectuer des distances (variables selon le modèle de VHR) en mode 100% électrique et disposent également du système de freinage régénératif (Turker, 2012).

- Les véhicules électriques purs (ou BEV pour Battery Electric Vehicle) sont quant à eux alimentés uniquement par un moteur de type électrique qui est rechargé par simple raccordement au réseau. Ceux-ci sont également équipés de la technologie de freinage régénératif.

Un autre type de véhicule, prometteur pour les années à venir, concerne les voitures à hydrogène. Ces véhicules mus par un moteur électrique sont dotés d'une pile à combustible et se déplacent grâce à l'électricité produite à partir d'hydrogène et d'oxygène. L'hydrogène, stocké dans un réservoir à haute pression, réagit de manière électrochimique avec l'oxygène contenu dans l'air. Il en résulte alors une production d'électricité fabriquée au sein même du véhicule. Les seuls produits rejetés par ce type de véhicule sont de la vapeur d'eau et de la chaleur. Tout comme les véhicules électrifiés, ils offrent un rendement énergétique bien supérieur à celui des modèles conventionnels (Automobile-propre, s.d.). La production de l'hydrogène et sa distribution en réseau ainsi que le prix de revient d'une pile à combustible constituent les obstacles actuels majeurs à leur essor.

Dans le cas du présent mémoire, ce sont les véhicules électriques purs ainsi que les véhicules hybrides rechargeables qui seront au centre de nos préoccupations. En effet, ceux-ci sont les deux types de véhicules pouvant être branchés sur secteur et dès lors pouvant avoir un impact réel sur le réseau électrique.

Pour des raisons de simplification, ces deux catégories de véhicules seront par la suite réduites aux termes de véhicule électrique ou encore véhicule électrifié (dont l'abréviation utilisée est VE).

Enfin, il convient aussi de mentionner le fait que d'autres types de véhicules électriques tels que les bus, les camions, etc. vont également connaître un essor particulier durant les années à venir. Cependant, ces types de véhicules ne seront pas considérés dans le

présent ouvrage. La raison de ce choix provient du fait que ce mémoire se concentrera uniquement sur le cas de la recharge de véhicules électrifiés en milieu résidentiel.

2.2. L'état actuel du marché belge

Les modèles électriques et hybrides rechargeables commencent peu à peu à se faire une place dans le marché de l'automobile belge. L'autonomie moyenne des VE commercialisés de nos jours dépasse rarement les 200km. Cette faible autonomie étant principalement due à des limitations liées aux batteries et à leur masse.

Pour aider à y voir plus clair sur ce qui est proposé actuellement sur le marché belge, voici un tour d'horizon non exhaustif (figure 1) :

Figure 1 : VE actuellement proposés sur le marché belge

Marque	Modèle	Temps de Charge (prise domestique/Wallbox) (heure)	Capacité Batterie (kWh)	Capacité Charge (kW)	Consommation (kWh/100km)	Autonomie Electrique (Km)	Prix (€)
Mitsubishi	i-MiEV	6,5 / 4	14,5	3,7	12,6	150	28.890
Citroën	C-Zero	6,5 / 4	14,5	3,7	12,6	150	29.985
Peugeot	iOn	6,5 / 4	14,5	3,7	12,6	150	30.120
Nissan	Leaf	13 / 7 – 6,5 – 4,5	30	3,6 – 4,6 – 6,6	15	250	29.225
Renault	Zoe R240	10 / 6 – 2,5 – 1,5	22	3,7 – 11 – 22	14,6	240	21.550
Renault	Kangoo ZE	10 / 6	22	3,7	14	125	28.011
Volkswagen	e-UP	8,5 / 5,5	18,7	3,6	11,7	160	26.280
Audi	A3 S e-tron	4 / 2,5	8,8	3,7	11,4	50	38.205
BMW	i3	8,5 / 5,5 – 4,5 – 3	18,8	3,7 – 4,6 – 7,4	12,6	200	37.200
Kia	Soul EV	12 / 7,5 – 6 – 4,5	27	3,7 – 4,6 – 6,6	14,7	212	35.290
Mercedes	B Sports Tourer Electric Drive	12,5 / 8 – 3	28	3,7 – 11	16,6	200	39.930
Nissan	E-NV200 Evalia	11 / 7 – 5,5 – 4	24	3,3 – 4,6 – 6,6	16,5	170	31.990
Volkswagen	e-Golf	11 / 7	24	3,6	12,7	190	37.110

Volkswagen	Golf GTE	4 / 2,5	8,7	3,6	11,4	50	38.920
BMW	330e	3,5 / 2,5	7,6	3,7	11,9	40	43.250
BMW	225xe Active Tourer	3 / 2	7,7	3,7	11,9	41	37.250
Mercedes	C 350e	3 / 2	6,2	3,7	11	31	52.217
Mercedes	GLC 350e 4Matic	4,1 / 2	8,7	3,7	15,2	34	54.813
Mitsubishi	Out- lander PHEV	5,5 / 3,5	12	3,7	13,4	50	55.490
Volkswagen	Passat GTE	4 / 2,5	8,7	3,6	N.C.	50	45.350
Volvo	V60 D6	4,5 / 3,5	12	3,6	21,7	50	59.080
BMW	X5 xDrive 40e	3,5 / 2,5	7,6	3,7	15,3	31	72.850
Mercedes	GLE 500e	4 / 3,5	8,8	2,8	16,7	30	76.956
Audi	Q7 e-tron Quattro	6 / 2,5	17,3	7,2	19	56	82.910
BMW	740e	3,5 / 2,5	7,6	3,7	12,5	40	97.250
BMW	i8	3 / 2	7,1	3,7	11,9	37	142.000
Mercedes	500e	4 / 3	8,7	3,7	13,5	33	118.701
Porsche	Cayenne S e-Hybrid	5 / 3 – 2,5 – 1,5	10,8	3,6 – 4,6 – 7,2	20,8	36	89.177
Porsche	Pana- Mera S e- Hybrid	4,5 / 3	9,4	3,6	16,2	36	107.690
Tesla	Model S 90D	39 / 8 – 4,5	90	11 – 22	23,5	502	103.900
Volvo	XC90 T8	4,5 / 2,5	9,2	3,6	18,2	43	80.350

Source : Moniteur Automobile – 11 Mai 2016 – N°1627

Comme le révèle ce tableau, une gamme avoisinant les 30 véhicules électriques et hybrides rechargeables est proposée en Belgique. Les capacités des batteries des modèles proposés varient de 6,2 kWh à 30 kWh, à l'exception de la Tesla qui offre une capacité de 90 kWh. De telles capacités permettent aux VE de parcourir des distances allant de 31 km à 250 km (en ayant uniquement recours au moteur électrique) et jusqu'à 500 km pour la Tesla.

Par ailleurs, comme il le sera expliqué plus en détails dans la section relative aux bornes de recharge, les modèles proposés offrent, pour la plupart, seulement la possibilité d'une recharge lente (voire semi-lente)².

Le dernier point du tableau concerne les prix de vente de ces VE. Avec un prix minimum de 21.550€, la Renault Zoe est le véhicule le moins cher du marché des VE. Le prix moyen se situant aux alentours des 30.000€. Plusieurs raisons justifient un prix moyen si élevé à l'heure actuelle. Tout d'abord, les constructeurs investissent des sommes considérables en recherche et développement pour diverses raisons : alléger les véhicules, améliorer le système de freinage régénératif et surtout accroître les performances des batteries. Deuxièmement, les VE sont produits en petite quantité ce qui induit des économies d'échelle beaucoup plus faibles que celles obtenues pour les véhicules à combustion classique produits en beaucoup plus d'exemplaires (Voiture-electrique.durable, s.d.). Enfin, les VE sont équipés de batteries, principalement au lithium, qui coûtent entre 6000€ et 12000€ selon le modèle et l'autonomie souhaitée (Voiture-electrique.durable, s.d.).

Les chiffres concernant la situation du parc automobile électrique en Belgique prouvent que le déploiement de l'électromobilité n'est encore qu'au commencement, car très minime. En effet, les statistiques fournies par la FEBIAC (Fédération Belge de l'Automobile et du Cycle), voir figure 2, datant de la fin du mois de décembre 2015 sont assez éloquentes à ce sujet :

Figure 2 : Composition de la flotte de véhicules en Belgique (Fin Décembre 2015)

BEL									
			Cy Leasing	Cy no leasing	Total Cy	Self-employed	Private	TOTAL	%
Benzine			15.638	85.065	100.703	93.584	1.921.619	2.115.906	409,57%
Diesel			309.962	399.092	709.054	193.989	2.493.271	3.396.314	657,42%
Hybride benzine	Plug in	Range extender	183	616	799	30	160	989	0,19%
		No Range extender	196	2.029	2.225	26	212	2.463	0,48%
	No plug-in		4.349	6.222	10.571	1.073	16.297	27.941	5,41%
Totaal Hybride Benzine			4.728	8.867	13.595	1.129	16.669	31.393	6,08%
Hybride Diesel	Plug in		72	223	295	5	38	338	0,07%
		No plug-in	695	1.271	1.966	56	313	2.335	0,45%
Totaal Hybride Diesel			767	1.494	2.261	61	351	2.673	0,52%
Electrisch	Electric		339	2.239	2.578	101	628	3.307	0,64%
		Brandstofcel	0	1	1	0	0	1	0,00%
Totaal Electrisch			339	2.240	2.579	101	628	3.308	0,64%
CNG			111	811	922	100	838	1.860	0,36%
LPG			12	625	637	1.181	15.292	17.110	3,31%
Onbekend			2	815	817	79	17.955	18.851	3,65%
Totaal			331.559	499.009	830.568	290.224	4.466.623	5.587.415	1081,5%

Source : FEBIAC, 2016

² C'est pourquoi, seuls ces types de recharge sont considérés dans le cadre de la modélisation.

On constate que sur les 5.587.415 véhicules qui composent le parc automobile belge en décembre 2015, 7.098 véhicules sont de types hybride rechargeable et électrique³. Ce nombre ne représente approximativement que 0,13% du parc automobile belge. Un autre fait intéressant concerne le fait que la majeure partie de la flotte de VE est détenue par les entreprises. En effet, ces dernières détiennent, sous contrat de leasing ou non, pas moins de 5.898 VE, soit près de 83% du parc de VE.

Les statistiques détaillées par région⁴ révèlent d'autres éléments essentiels. On constate que la plus grande partie du parc de VE se situe dans le nord du pays. En effet, la Flandre totalise 5.075 VE, contre 1.107 pour la Wallonie et 916 pour la région de Bruxelles. Cela représente plus de 71% du parc attribuable à la Flandre.

Ce déploiement plus important dans le nord du pays s'explique principalement par le fait d'une politique plus encline en faveur de l'électromobilité en Flandre que dans la région de Bruxelles-Capitale et qu'en Wallonie. En effet, la Flandre peut se vanter d'accorder une prime pour tout achat de véhicule 100% électrique. Cette prime peut aller jusqu'à 5.000€ (en fonction du prix d'achat du VE) et sera dégressive jusqu'à 2.500€ pour les VE dont la valeur catalogue dépasse les 61.000€. La prime diminuera d'année en année jusqu'en 2020, année de sa suppression. De plus, elle ne sera octroyée qu'aux particuliers vivant en région flamande. Les entreprises quant à elles bénéficient de la déductibilité à 120% pour l'achat d'un VE (Willems, 2016), pour autant qu'il ne soit pas équipé d'un « Range Extender ».

Enfin, il faut toutefois relever le fait que, malgré le faible taux de pénétration actuel des VE au sein du parc automobile belge, une nette croissance peut être constatée au cours de ces dernières années. Les statistiques de la FEBIAC (2016) concernant le nombre d'immatriculations de VE en Belgique prouvent qu'une croissance des immatriculations de VE se répète chaque année depuis 2010, à l'exception de l'année 2013 qui a connu une légère diminution. Le plus grand nombre d'immatriculations étant à attribuer à l'année 2015 avec 3.837 immatriculations de VE (contre un total de 501.066 immatriculations, tous véhicules confondus).⁵

³ Pour rappel, l'abréviation pour ces deux types de véhicules est VE.

⁴ Voir Annexe 1 : «Statistiques du parc automobile belge».

⁵ Voir Annexe 1 : «Statistiques du parc automobile belge».

Afin de clore cette section relative au marché actuel de l'automobile électrique, parlons brièvement de la situation en Europe. Selon Croisé (2015), sur le premier semestre de l'année 2015, les immatriculations de VE ont progressé de 50%. La palme revient à la Norvège, pays fortement concerné par les questions environnementales, où près d'un véhicule vendu sur six est électrique. Notons également que la progression de l'électromobilité est nettement plus marquée en Europe de l'Ouest, avec la France à la seconde position du classement.

2.3. Le marché de demain

À l'heure actuelle, il est encore très difficile de prédire de quoi sera fait le marché futur des VE. Cependant, de nombreuses études prouvent que l'électromobilité est vouée à connaître un essor particulier dans les années à venir. Prédire le nombre de véhicules électrifiés sur nos routes à l'horizon 2030 n'est pas une tâche aisée et nécessiterait une étude approfondie. Les études menées à ce sujet ne sont pas encore nombreuses ni facilement disponibles. Celle établie par Chèze, Gastineau & Tchung-Ming (2015, pp. 17-46) et recommandée par Traxio, Confédération belge du Commerce et de la Réparation automobile et des Secteurs connexes, semble être appropriée dans le cas de ce présent ouvrage et sera utilisée ultérieurement pour la construction du modèle⁶.

Cette prédiction d'évolution du parc prend en compte une série de facteurs qui auront plus que probablement une influence sur le nombre de véhicules électrifiés sur nos routes à l'horizon 2030. Ils sont, pour certains, les moyens mis en place par les gouvernements afin d'atteindre les objectifs (fixés à l'horizon 2050) de la Commission Européenne de réduction de 60% des émissions de gaz à effet de serre relatives au secteur du transport Européen (Commission Européenne, 2011). Voici les principaux facteurs pris en compte dans l'étude⁷ :

- Développement des infrastructures de recharge ;
- Evolution des prix de l'énergie ;
- Progrès sur l'efficacité des véhicules à combustion interne ;

⁶ Voir chapitre 5.

⁷ Cette étude porte le nom de « SElecTRA » qui tient pour « **S**cenarios for the **E**lectrification of **T**ransports ». Ce projet d'étude européen est l'aboutissement de 3 années de travaux.

- « Prime de mise à la casse » (Scrappage Program)⁸ ;
- Subvention des véhicules électrifiés ;
- Accises sur le carburant ;
- Taxes CO2 sur les véhicules.

La considération ou non de ces différents facteurs, à des degrés divers, donne plusieurs cas possibles de développement du parc automobile électrique belge. Les limites étant fixées par la situation la plus favorable (nombre maximum de véhicules électrifiés sur nos routes en 2030) et la moins favorable (nombre minimum) au développement. Le cas le plus optimiste proposé par l'étude fait état d'un développement accru des infrastructures de recharge, de prix de l'énergie élevés, de progrès modérés quant à l'efficacité des véhicules à combustion interne, d'une prime de mise à la casse, de subventions accordées à l'achat d'un véhicule électrifié, d'actions gouvernementales spécifiques quant aux taxes sur le carburant et enfin de taxes CO2 élevées. Le cas le plus pessimiste étant exactement l'opposé du premier. Ces deux scénarios prédisent dès lors (pour l'horizon 2030) :

- Cas optimiste : un parc composé de 490.000 VE (soit approximativement 8,8% du parc automobile belge total actuel)⁹;
- Cas pessimiste : un parc composé de 194.000 VE (soit approximativement 3,5% du parc automobile belge total actuel).

À titre de comparaison, le pays européen supposé posséder la plus grande flotte de véhicules électrifiés à l'horizon 2030 est l'Allemagne, avec 10.024.000 véhicules dans le cas le plus favorable et 2.330.000 véhicules dans l'autre cas.

Force est de constater les écarts entre les deux scénarios !

⁸ « Scrappage Program » est un programme mis en place par les gouvernements afin de promouvoir le remplacement des véhicules anciens par des véhicules plus modernes.

⁹ Pour rappel, le parc automobile belge total fin décembre 2015 comprenait 5.587.415 véhicules.

D'autres études, comme celle publiée par Bloomberg New Energy Finance ([BNEF], 2016), prédisent également un avenir prometteur aux VE. Il ressort de cette dernière que les VE ne devraient pas connaître un véritable essor d'ici 2020. Cependant, dans la décennie qui suivra, de nombreux progrès technologiques devraient avoir lieu notamment dans le domaine des batteries lithium-ion¹⁰ ainsi que d'autres composés, et plus particulièrement le coût des batteries qui rendrait les VE financièrement plus abordables que les véhicules à combustion interne.¹¹

2.4. Les batteries

Les batteries sont très certainement le point sensible des VE. Celles-ci sont non seulement à l'origine de l'autonomie du véhicule mais aussi de leur performance. Elles ont pour fonction de stocker de l'énergie électrique en convertissant de l'énergie chimique en électricité. Il existe une grande variété de batteries pouvant équiper les VE (Plomb, Nickel Métal Hydrure, Zebra, etc.). Cependant, ce sont actuellement les batteries au Lithium-ion qui sont privilégiées pour diverses raisons. Les avantages de ce type de batteries sont multiples : forte densité énergétique (énergie par unité de volume), importante énergie massique (énergie par unité de masse), durée de vie élevée et absence d'effet mémoire (Belaoui, 2015, pp. 7-10). Pour information, l'énergie massique d'un pack batterie Li-ion tel qu'embarqué à bord d'un VE est de l'ordre de 150 à 200 Wh/kg (Arebor-energie, s.d.). À titre d'exemple, cette technologie Li-ion, ainsi que ses variantes, possède une énergie massique 3 à 4 fois supérieure à celle des batteries plomb-acide. De plus, le rendement de conversion en énergie se situe aux alentours de 90% pour ce type de batterie (Badey, 2012, p. 13). Le rendement obtenu est donc bien plus important que les véhicules diesel et essence actuellement disponibles sur le marché qui fournissent des rendements maximaux de l'ordre de 42% pour le diesel et de 36% pour les moteurs à essence (IFP Énergies Nouvelles [IFPEN], s.d.).

Les batteries étant le point critique des VE, il est évident que les plus grandes attentes technologiques sont à prévoir dans ce domaine. Toujours selon l'étude menée par BNEF (2016), les batteries lithium-ion sont supposées coûter moins de 120\$ par kWh à

¹⁰ Pour plus d'informations sur les batteries, voir section « Les batteries ».

¹¹ Toujours selon l'étude BNEF (2016), à condition que le prix du baril de pétrole se situe entre 50\$ et 70\$, et qu'un VE équipé d'une batterie de 60kWh puisse parcourir 320km entre deux charges.

l'horizon 2030¹², ce qui représente approximativement le tiers des prix actuels. Avec de tels prix, BNEF (2016) affirme même que le prix de marché des VE sera inférieur à celui des véhicules à combustion interne à l'horizon 2025.

Différents challenges en matière de batteries sont à relever pour les chercheurs dans les années à venir, et ce dans le but de rendre plus crédible l'offre de véhicules électriques sur le marché (Voiture-electrique-populaire, s.d.). En voici les principaux :

- Augmentation de la capacité de stockage d'énergie¹³ ;
- Diminution des temps de charge ;
- Augmentation du nombre de cycles de décharge-recharge
- Amélioration au niveau de la sécurité ;
- Diminution des coûts des batteries ;
- Renforcement du recyclage et de l'approvisionnement en Lithium.

La durée de vie des batteries au lithium-ion, calculée en fonction du nombre de cycles « charges-décharges », varie de 1000 à 2000 cycles et plus. La température, le niveau de charge ainsi que le protocole de charge sont les principaux facteurs influençant la longévité de celles-ci (Association des Véhicules Électriques du Québec [AVÉQ], 2013). Comme mentionné dans le tableau dédié au marché actuel des véhicules électrifiés (figure 1), l'autonomie moyenne offerte par ces véhicules varie aux alentours des 150km.

Il est toutefois possible d'augmenter cette autonomie au moyen du « range extender ou prolongateur d'autonomie ». Cette technologie consiste en un moteur thermique qui entraîne un générateur de courant pour produire de l'électricité et ainsi garantir une autonomie plus élevée (Automobile-Magazine, s.d.).

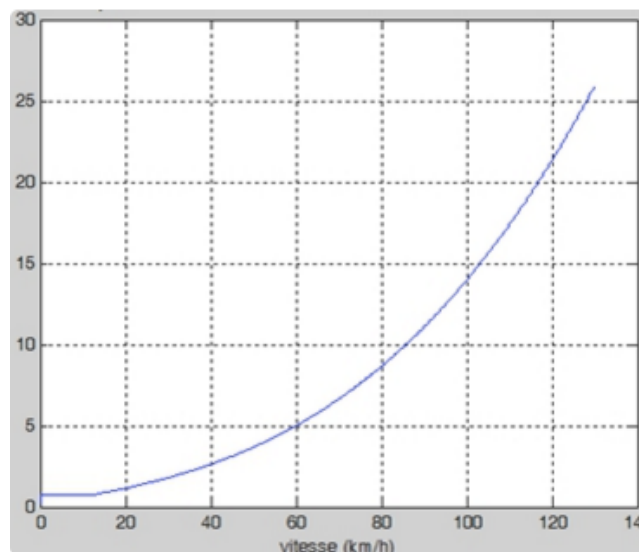
Enfin, il convient également de donner un ordre de grandeur quant à la puissance électrique à fournir par les batteries actuelles. La puissance électrique maximale de ces véhicules n'est in fine que très rarement atteinte : uniquement lors des phases

¹² Une étude menée par McKinsey & Company, & Amsterdam Roundtables Foundation (2014) prédit des coûts de 200\$ / kWh pour 2020 et 160\$ / kWh pour 2030.

¹³ Le but étant d'offrir une plus grande autonomie avec des batteries plus légères.

d'accélération ou encore lors d'une montée. Par exemple, pour un véhicule ayant une puissance maximale de 70 kW, il fonctionnera à 26kW de puissance sur une durée prolongée à 130 km/h. En ville, la puissance nécessaire pour se déplacer sera de l'ordre de maximum 5kW (Expert-ve, s.d.). La figure 3 donne une illustration de la puissance électrique absorbée (kW en axe des ordonnées) par un véhicule à vitesse stabilisée.

Figure 3 : Puissance électrique absorbée par un VE en fonction de sa vitesse



Source : <http://www.expert-ve.fr/range-extender-plugin-hybrid.html>

Afin de clôturer cette section relative aux batteries, il semble nécessaire de mentionner l'existence d'une technologie prometteuse, parmi tant d'autres, qui est celle des batteries lithium-air (Li-O₂). Celles-ci offriraient une grande autonomie (on parle de 600km) ainsi qu'un coût et une masse beaucoup plus faibles. Leur densité énergétique particulièrement élevée serait comprise entre 1.700 Wh/kg et 2.400 Wh/kg (et théoriquement jusque 3.450 Wh/kg) (PrixInnovateurs, 2016). Cependant, bien qu'elles aient un avenir prometteur, les chercheurs estiment un temps d'attente d'au moins 10 ans avant qu'elles ne soient opérationnelles... des améliorations devant encore être apportées, particulièrement sur les temps de recharge ainsi que sur la durée de vie (Chevalier, 2015).

2.5. Les bornes de recharge

Comme déjà dit auparavant, le développement de l'infrastructure des bornes de recharge est un facteur déterminant dans le développement du marché des VE. Actuellement, la majorité (62%) des bornes de recharge publiques en Europe se situe en Allemagne, Pays-Bas, France, Espagne et Angleterre (Chèze et al., 2015, pp. 17-46).

Tout comme les véhicules thermiques nécessitent d'être alimentés en carburant afin de se déplacer, il convient pour les VE de « faire le plein » en électricité (sans oublier qu'elles disposent également d'un système de récupération d'énergie au freinage ou lors des décélérations = système de freinage régénératif).

Deux solutions sont offertes aux propriétaires de VE afin d'effectuer cette recharge à domicile : soit à l'aide de la prise domestique standard en utilisant le câble fourni avec le véhicule, soit en ayant recours à une « wallbox ». Les câbles de recharge fournis à l'achat d'un VE sont volontairement limités à une intensité de 8 à 10A. Alors que la première option présente un avantage au niveau des coûts, la seconde est recommandée pour des questions de sécurité et propose des intensités de charge plus élevées de 16A¹⁴, 32A voire 50A permettant dès lors d'obtenir des temps de recharge inférieurs (Masson, 2013). Il faudra compter entre 500 et 1.200€ pour acquérir ce boîtier mural, hors frais d'installation (Automobile-propre, s.d.). Selon que l'on opte pour une recharge via la prise domestique ou via une wallbox, la puissance de charge délivrée par chacune des alternatives sera différente¹⁵ :

- Prise domestique (230V, 10A) : 2,3 kW ;
- Wallbox : soit une charge lente classique de 3,7 kW (230V, 16A) soit une charge semi-lente de 7,4 kW (230V, 32A).

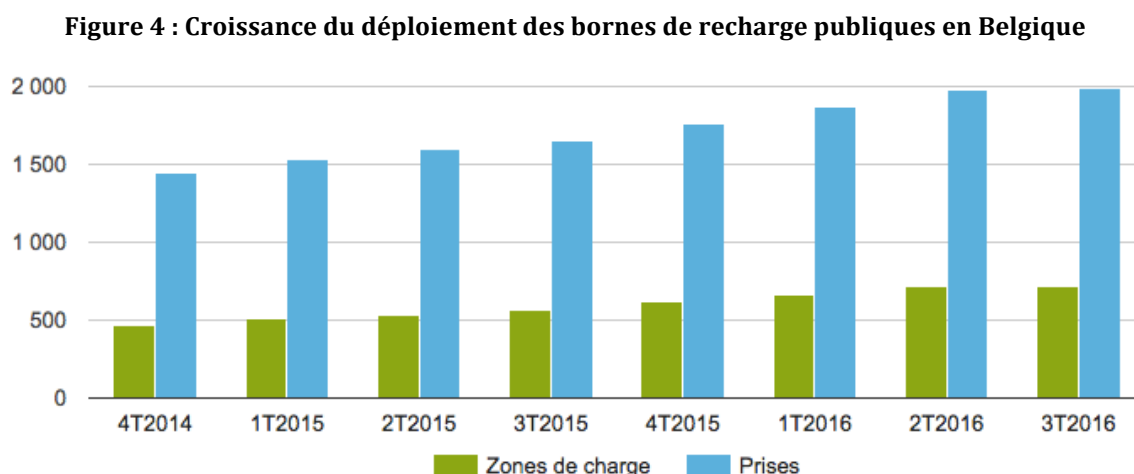
Outre les recharges à domicile, il existe également les bornes de recharge publiques qui commencent peu à peu à se déployer. Celles-ci se situent principalement dans les parkings publics, les lieux en voirie ou à proximité des commerces. La localisation de ces

¹⁴ L'intensité de 16A est la plus courante actuellement.

¹⁵ Ces trois puissances de recharge seront celles retenues dans le cadre de la modélisation.

bornes est disponible sur des sites tels que chargemap, asbe, openchargemap ou encore plugshare. Elles permettent le rechargement du véhicule de manière lente, d'autres de manière lente et semi-rapide, voire rapide.

Les statistiques proposées en ligne sur le site Chargemap (2016) concernent la croissance du nombre de bornes de recharge accessibles au public sur le sol belge (figure 4). Elles démontrent que le déploiement de ces bornes publiques connaît une certaine progression.



Source : <https://fr.chargemap.com/about/stats/belgique>

À l'heure actuelle, la Belgique compterait pas moins de 722 zones de charge publiques pour un total de 1.986 prises. La répartition de ces prises suivant la vitesse de recharge est la suivante : 35,1% sont de type standard, 32,2% semi-accélérée, 26,4% accélérée et 6,3% de type rapide. Enfin, pour ce qui concerne la répartition de ces points de charge par type de lieux, la majorité se trouve sur des parkings (29,2%), aux sièges des entreprises (14%) et près des commerces (11,8%).

Notons toutefois que ces 722 zones de recharge, c'est très peu... surtout quand une directive européenne impose à la Belgique d'en avoir déployé 21.000 pour 2020 (Commission Européenne, 2013) !

Les bornes de recharge publiques sont essentielles car elles permettent de rassurer l'utilisateur du VE quant à l'autonomie dont il dispose. Toutefois, il existe une solution alternative aux bornes de recharge : les stations d'échange de batteries. Comme c'est d'ores et déjà le cas en Grande-Bretagne, en Israël ou encore au Danemark, ce système

pourrait être amené à se développer au cours des prochaines années sur notre territoire (quoique son avenir soit encore fort incertain). Il suffirait à l'automobiliste de se rendre dans une station proposant ce service pour ainsi échanger la batterie usagée contre une batterie chargée. Le temps nécessaire à cette opération ne prendrait pas plus de temps qu'un plein de carburant classique (Automobile-propre, s.d.). Cette alternative suppose néanmoins l'utilisation de packs normalisés entre fabricants, ce qui constitue un challenge très important...

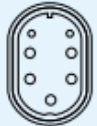
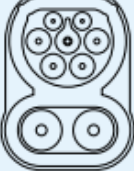
Une borne de recharge peut être définie selon trois critères (Opérateur des Réseaux Gaz et Électricité [ORES], 2014, pp. 12-14) :

- Le type de socle de prise ;
- Le mode de rechargement¹⁶ ;
- Le cas de recharge (qui aborde les différentes combinaisons possibles de rechargement).

Il existe actuellement 6 types de socles de prise dont les principales informations sont reprises dans la figure 5.

Figure 5 : Types de socles de prise et caractéristiques principales

	Recharge lente	Recharge semi-rapide	Recharge rapide	Disponible en Europe
Type 1	●			Japon
Type 2	●	●	● (CA ¹⁰)	●
Type 3	●	●		●
Type 4			● (CC ¹¹)	●
Domestique	●			●
Combo coupler			●	en développement

	T1 Type 1	T2 Type 2	T3 Type 3	T4 Type 4	Do Domestique	Combo Coupler
Socle de prise						
	YAZAKI	MENNEKES	EV Plug Alliance	CHADEMO		
Puissance	3 à 7kW AC (monophasé)	3 à 43kW AC (triphasé)	3 à 22kW AC (triphasé)	50kW DC	3kW AC (monophasé)	3 à 43 kW AC (triphasé) 150 kW DC
Mode de charge	Mode 3	Mode 3	Mode 3	Mode 4	Mode 1 et 2	Mode 3 (AC)
Application	Véhicule	Véhicule & infrastructure	Infrastructure	Véhicule	Infrastructure	Véhicule
Obturbateurs	Non	Non	Oui	Non	Oui	Non

Source : ORES (2014, pp. 12-14)

¹⁶ Les modes de rechargement feront l'objet de la section suivante.

Notons qu'il n'existe pas de standardisation contraignante en Belgique, bien que le standard préconisé par la Commission européenne soit le socle de prise de type 2 (Mennekes)¹⁷ (Mennekes, 2015, p. 85).

2.6. Les modes de recharge

Il existe actuellement 4 modes de recharge pour véhicules électriques (Vinçotte, s.d.) :

- **Mode 1 :** Prise domestique et rallonge. Pour ce premier mode, il suffit simplement de brancher le véhicule sur le secteur en courant alternatif à l'aide d'une prise normalisée. L'intensité du courant pour le mode 1 est de 16A maximum ;
- **Mode 2 :** Prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection. Dans ce cas, le VE se branche à nouveau sur secteur en courant alternatif mais l'intensité maximale s'élève à 32A et un boîtier de contrôle accompagne le câble ;
- **Mode 3 :** Prise spécifique sur un circuit dédié. Ce troisième mode fut développé afin d'accroître la sécurité. Une station de recharge est raccordée de manière fixe à l'installation électrique de l'habitation. La liaison entre le véhicule et la station de recharge est assurée par un câble spécial ainsi que des prises et fiches spécifiques. Le véhicule peut être rechargé plus rapidement car le mode 3 permet des intensités de courant supérieures à celles des modes 1 et 2. Une intercommunication entre le véhicule et la station de recharge permet un processus de recharge contrôlé ;
- **Mode 4 :** Chargeur de batterie externe. Le dernier mode permet la charge de type « rapide » au moyen d'une station de charge délivrant, contrairement aux autres modes, du courant continu.

¹⁷ Voir Annexe 2 « Illustration d'un socle de prise de type 2 » pour une image réelle d'un socle de prise de type 2.

La figure 6 propose un récapitulatif de ces modes de recharge incluant le temps de charge nécessaire pour « faire le plein complet» du véhicule¹⁸ ainsi que les puissances de charge associées.

Figure 6 : Caractéristiques des principaux modes de recharge

Type de recharge	Lent mode 2	Normal mode 3		Accélérée mode 3		Rapide mode 3	Rapide mode 4
Réseau	Monophasé 230 V			Triphasé 400 V			Courant continu
Courant de recharge	8 A	16 A	32 A	16 A	32 A	63 A	120 A
Puissance	2 KW	3 KW	7 KW	11 KW	22 KW	43 KW	50 KW
Temps nécessaire Pour faire "le plein"							
	12 h	6 H	3 H	2 H	1 H	50 mn	20 à 30 mn

Source : <http://www.yuccaloc.com/notre-offre/recharge.html>

¹⁸ Le VE considéré est équipé d'une batterie d'une capacité de 22 kWh, considérée comme la moyenne actuelle.

3. Les automobilistes

De nos jours, le nombre véhicules électrifiés sur les routes belges est encore très faible malgré la croissance significative du nombre de ventes.¹⁹ Le paradoxe de la poule et de l'œuf prend tout son sens face à cette situation si l'on se limite uniquement aux automobilistes et aux infrastructures de recharge. Tant que ces dernières ne sont pas déployées en conséquence, les consommateurs auront moins de motivation à passer du côté de l'électromobilité. D'autre part, tant que les consommateurs ne décideront pas à passer aux VE, le déploiement de bornes de recharge publiques peinera à se mettre en place. Cependant, il faut toutefois reconnaître que le nombre de bornes a bel et bien augmenté ces dernières années et que certains efforts sont fournis afin d'en promouvoir leur expansion sur le territoire belge et surtout européen.²⁰

La question pour le consommateur, avant de poser un choix concernant le type d'automobile (diesel, essence, électrique, hybride, etc.) est de déterminer quels sont ses besoins réels et quel moteur pourrait au mieux y répondre. Des questions du type « Combien de kilomètres sont parcourus chaque année ? » ou encore « Dans quel type d'environnement dominant (autoroute, ville, etc.) ? » sont des étapes par lesquelles il est primordial de passer avant de faire son choix. L'autonomie des véhicules électrifiés étant, pour la plupart des consommateurs, considérée comme le gros point noir de cette « nouvelle » génération de véhicules.

Il convient également pour l'acheteur d'opter pour la solution la plus rentable du point de vue économique ou encore la plus écologique pour la planète si sa sensibilité à cet égard est suffisante. Un facteur, certainement le plus déterminant, concerne le prix du véhicule qui peut être encore élevé pour les VE mais qui est supposé diminuer dans les années à venir (Boucher, 2015).²¹

En Belgique, malgré certaines incitations gouvernementales (plus particulièrement en Flandre) qui tendent à rapprocher le prix des véhicules électrifiés au même niveau que

¹⁹ Voir Annexe 1 : « Statistiques du parc automobile ».

²⁰ Voir figure 4 pour les statistiques relatives au nombre de bornes de recharge publiques sur le territoire belge.

²¹ Voir section « Le marché de demain » pour plus d'informations.

celui des véhicules à combustion interne classiques, certains facteurs justifient la lenteur de pénétration au sein du parc automobile belge. Outre le prix, on peut notamment relever deux facteurs qui constituent un frein pour les consommateurs :

- Le temps de recharge, particulièrement long sur les bornes de recharge lentes ;²²
- La peur de la panne qui est due à la faible autonomie des véhicules électrifiés actuellement sur le marché.²³ On parle dans ce cas de l'effet d'inquiétude qui peut être principalement atténué (voire annulé) par le déploiement de bornes de recharge publiques ou par l'accroissement de l'autonomie des VE ou encore par l'option « range extender ». Cette autonomie restreinte tend à qualifier les véhicules électrifiés actuels de véhicules à usage principalement urbain ou périurbain.

Le deuxième facteur peut toutefois être nuancé par le fait que la distance moyenne parcourue par un citoyen belge est facilement couverte par l'autonomie des véhicules électrifiés actuellement sur le marché.²⁴ En effet, selon Campeol (2015), malgré que le citoyen belge soit considéré comme « un gros rouleur », le VE peut satisfaire à 95% de ses trajets. Campeol (2015) rappelle également qu'en moyenne le citoyen belge ne fait que trois déplacements de plus de 100 km par an.

Par ailleurs, il convient de relever certains facteurs jouant en faveur de l'électromobilité. En voici les principaux :

- Confort de conduite, silence du moteur ;
- Prix d'entretien largement réduit ;
- Solution écologique pour la planète bien que ce point-ci suscite plusieurs contestations (Ecorenove, 2016). Il est primordial, afin de qualifier ces véhicules de « verts », qu'ils soient alimentés en électricité provenant de sources d'énergie renouvelable sans quoi

²² Voir section « Les modes de recharge » pour plus d'informations (figure 6 pour les temps de recharge moyens).

²³ Voir section « L'état actuel du marché belge » pour plus d'informations.

²⁴ Les distances moyennes parcourues par les citoyens belges seront détaillées ultérieurement dans cet ouvrage, dans la section propre au modèle.

l'utilisation des VE perdrait tout son sens.²⁵ De plus, la fabrication des batteries nécessite de nombreux produits chimiques comme le lithium²⁶ et le cobalt. Leur recyclage est également un problème à considérer même si des progrès très significatifs ont été accomplis.

Davantage d'informations concernant les automobilistes, comme par exemple les habitudes de roulage, seront décrites et utilisées ultérieurement afin d'établir une modélisation du profil de charge des VE.²⁷

²⁵ BNEF (2016) estime qu'environ 70% de la nouvelle production d'électricité en 2030 proviendra de l'énergie éolienne, du solaire et d'autres sources d'énergies propres.

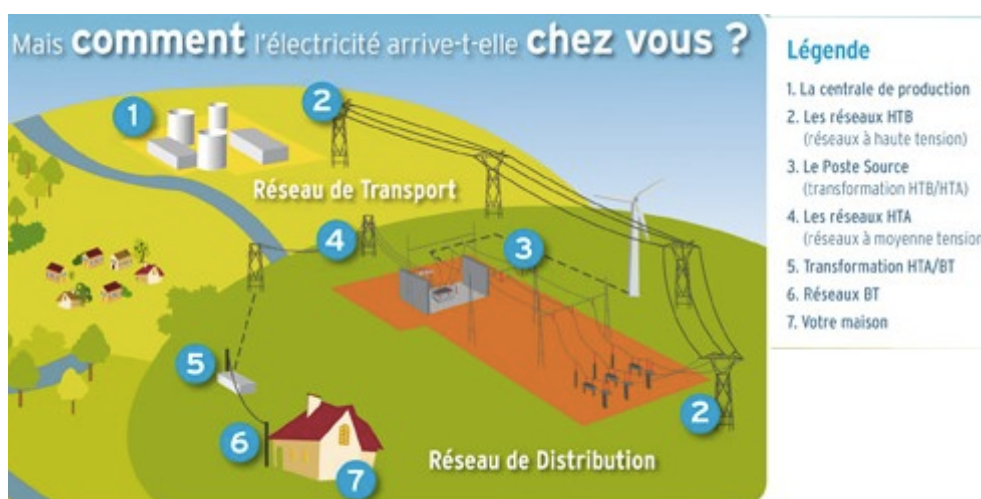
²⁶ La batterie équipant un VE nécessiterait environ 5 kg de Lithium. Les réserves de Lithium sont estimées à 13,5 millions de tonnes, à 39,5 millions de tonnes pour les ressources ultimes, selon les estimations du U.S. Geological Survey (Wikipédia, 2015).

²⁷ Voir Chapitre 5.

4. Le système électrique belge

Il est évident que l'apparition de plus en plus conséquente de véhicules électrifiés sur nos routes augmentera la demande globale en électricité. Cependant, pour l'horizon 2030, la part de cette demande relative à l'électromobilité ne devrait représenter qu'une part minime de la demande totale d'énergie du transport routier et de la demande totale d'électricité, tous secteurs confondus (Chèze et al., 2015, pp. 17-46). L'augmentation de cette demande soulève la question des sources de production électrique sur notre territoire. Une fois cette électricité produite, il conviendra de l'acheminer vers les consommateurs afin de recharger les VE.²⁸ Le parcours ainsi suivi par l'électricité sera décrit dans les lignes qui suivent. La figure 7 propose tout d'abord un schéma illustratif de l'acheminement de l'électricité depuis la centrale de production jusqu'au foyer.

Figure 7 : Schéma du cheminement de l'électricité



Source : <http://www.seolis.net/Le-cheminement-de-l-electricite>

Le marché belge de l'électricité est divisé en deux grands pôles (Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières [FEBEG], s.d.) :

²⁸ Notons qu'il existe également la production locale qui, en cas de consommation totale de ce qui a été produit au moment où elle est produite, ne nécessite en théorie que peu ou pas recours au réseau. C'est seulement en cas de consommation excédentaire que le surplus sera réinjecté dans le réseau.

- La production et la fourniture d'électricité qui sont des activités libéralisées.
- Le transport et la distribution d'électricité qui sont quant à elles des activités régulées.

Le système électrique belge fait intervenir une multitude d'acteurs. Depuis la production d'électricité à sa consommation, on y retrouve six groupes (Elia, s.d.) : les producteurs d'électricité, les fournisseurs, les gestionnaires de réseau de transport (GRT), les gestionnaires de réseau de distribution (GRD), les régulateurs et les consommateurs finaux. Les sections qui suivent apportent davantage d'informations sur le rôle de chacun de ces acteurs.

4.1. Production

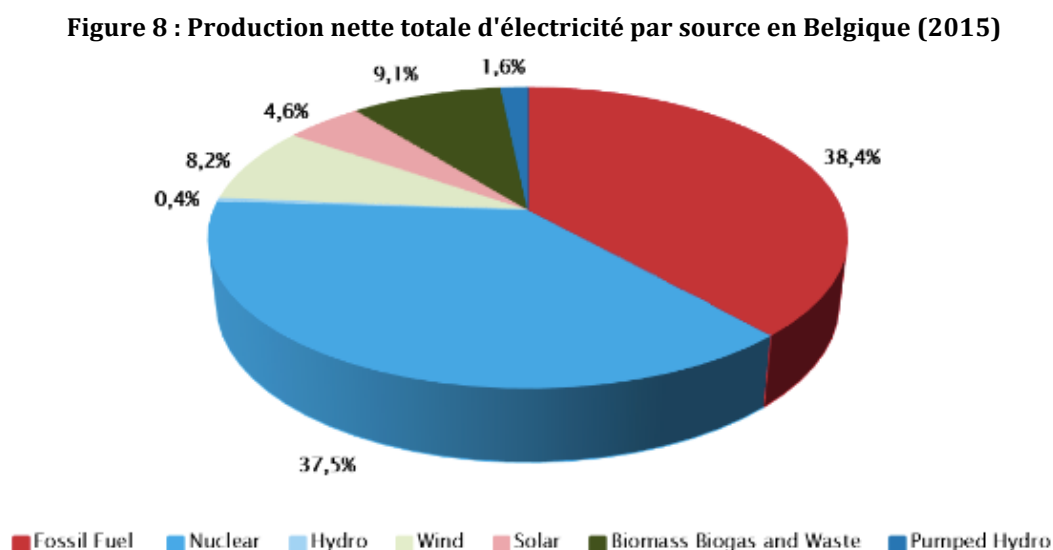
La production d'électricité constitue le premier maillon de la chaîne de notre système électrique. L'électricité peut provenir de deux unités de production distinctes :

- Soit elle est produite dans de grandes unités de production centralisées (centrale nucléaire, centrale thermique fossile, centrale hydraulique, etc.) et directement reliées au réseau de transport, géré par l'unique Gestionnaire de Réseau de Transport belge, Elia. Dans ce cas-ci, l'électricité sera dans un premier temps acheminée à haute ou très haute tension avant de passer par un transformateur qui aura pour but de diminuer cette tension.
- Soit l'électricité est produite dans de petites unités de production décentralisées (photovoltaïque, éolienne, cogénération, etc.) et est susceptible d'être injectée dans le réseau à basse ou moyenne tension. Dans ce cas-ci, le réseau est géré par le Gestionnaire de Réseau de Distribution propre au territoire pour lequel il a été désigné.

L'électricité ne pouvant être stockée en grande quantité²⁹- dans nos régions-, il convient qu'elle soit produite au moment de sa consommation, dans les quantités adéquates. A tout moment, la production doit donc être capable de satisfaire la demande (consommation + pertes). Une consommation supérieure à la production entraîne une chute de la fréquence³⁰ du flux alternatif alors qu'à l'inverse, une consommation inférieure à la production entraîne une augmentation de la fréquence (liée à la vitesse de rotation des alternateurs) qui doit être tenue dans une plage de +/- 1Hz (à défaut, risque pour les pompes, pertes transformateurs, synchronisation horloges, stabilité des machines, etc.). Notons également qu'en cas de chute de la fréquence en deçà de 49.8 Hz une politique de délestage de charge et un démarrage automatique de turbines à gaz est enclenché. En cas de diminution plus importante, on commencera à délester certains clients industriels et la clientèle domestique (Lilien, 2013, pp. 34-35).

Les statistiques fournies par la FEBEG (s.d.), nous procurent quelques informations intéressantes quant à la production et les capacités de production d'électricité.

En 2015, la production nette d'électricité en Belgique fut de 65,5 TWh. La figure 8 illustre la façon dont cette production est répartie suivant la technologie de production utilisée.



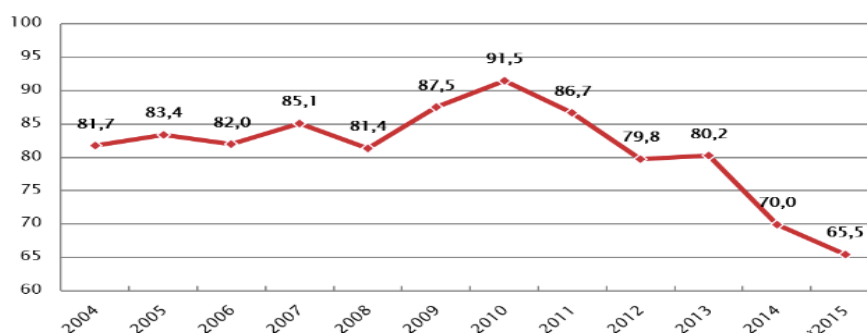
Source : <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>

²⁹ Elle peut être stockée en petite quantité dans des batteries.

³⁰ Le transport utilise une tension alternative suivant une fréquence de 50Hz en Europe (Elia, s.d., p. 3)

La production nette d'électricité a connu une diminution considérable au cours des cinq dernières années, passant de 91,5 TWh en 2010 à 65,5 TWh en 2015. La figure 9 illustre l'évolution de la production nette d'électricité pour la décennie écoulée.

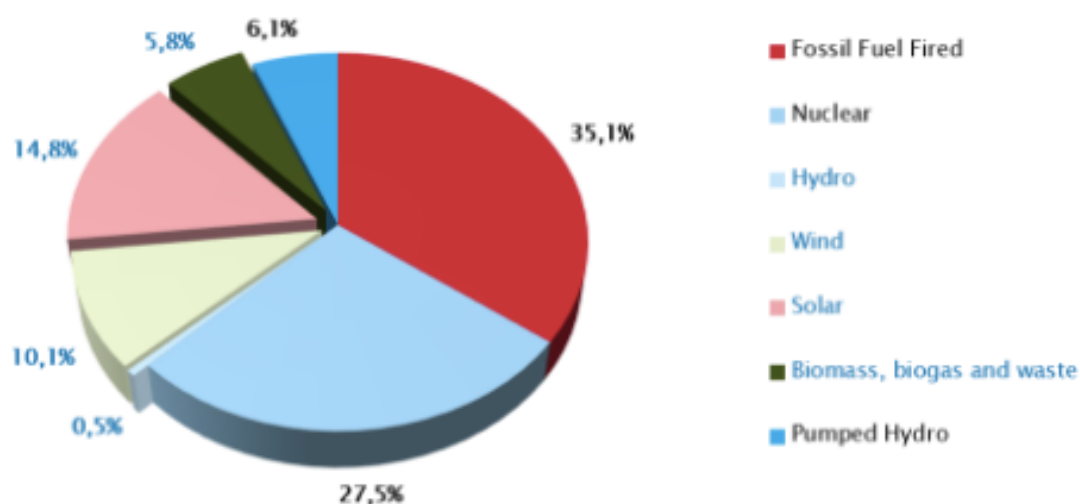
Figure 9 : Évolution de la production nette d'électricité (TWh) en Belgique, de 2004 à 2015



Source : <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>

En ce qui concerne la puissance de production installée en Belgique, elle atteint les 21,5GW pour l'année 2015. La figure 10 représente la répartition de l'ensemble des capacités de production par technologie utilisée.

Figure 10 : Capacité installée en Belgique par technologie de production



Source : <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite>

Outre la production locale belge, la Belgique est marquée par une croissance de ses importations d'électricité. En 2015, l'importation nette couvrait pratiquement 26% de la consommation totale nette calculée d'électricité (FEBEG, s.d.).

Ces données sont destinées à connaître un bouleversement dans les années à venir. Le plus grand changement étant prédit dans le secteur du nucléaire. En effet, la loi du 31 janvier 2003, modifiée en 2013 et 2015, fixe une sortie progressive du nucléaire sur le territoire belge. C'est le 1^{er} Octobre 2022 que la loi sera d'abord appliquée au réacteur Doel 3. Suivront ensuite les arrêts des réacteurs de Tihange (1, 2 et 3) et de Doel 1 et 4. La fin du nucléaire étant prévue pour le 1^{er} Décembre 2025 avec l'arrêt du réacteur Doel 2. Par ailleurs, les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus importante dans la production d'électricité. La figure 11 illustre les prévisions fournies par le bureau fédéral du plan (Devogelaer, & Gusbin, 2015, pp. 41-44). Elles prévoient notamment l'éolien comme deuxième source principale d'énergie avec 27% à 34% des parts en 2030. L'énergie solaire représenterait quant à elle 7%.

Figure 11 : Scénarios de composition de la production d'énergie nette pour 2030 et 2050³¹

	2010	2030				2050			
		REF	GHG40	GHG40EE	GHG40EERES30	REF	GHG40	GHG40EE	GHG40EERES30
Nuclear energy	51	0	0	0	0	0	0	0	0
Hydro	0	1	1	1	1	0	0	0	0
Wind	1	27	31	28	34	34	34	37	44
Solar	1	7	7	7	7	11	10	9	8
Biomass & waste	6	11	12	11	13	9	8	10	12
Geothermal heat	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Coal	4	2	3	3	3	0	0	0	0
Natural gas	34	49	45	49	41	45	46	42	35
Other	2	2	1	1	1	1	1	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Source: PRIMES.

Note: 'Other' stands for petroleum products and derived gases.

Source : http://www.plan.be/admin/uploaded/201504270958240.WP_1503_10941.pdf

Outre ces sources de production, insistons toutefois sur le fait que l'alternative consistant à produire l'électricité localement, au moyen de panneaux solaires ou d'éoliennes par exemple, offre la possibilité de produire à l'échelle du kW. Cette solution

³¹ Les niveaux (GHG40, GHG40EE et GHG40EERES30) proposés par l'étude diffèrent par le niveau d'ambition dans le domaine de l'efficacité énergétique ainsi que le déploiement des énergies renouvelables. REF étant le scénario de référence.

permettrait notamment de ne pas surcharger le réseau³² et d'être ainsi son « propre producteur d'électricité ».

4.2. Transport

Considéré comme la colonne vertébrale du transport d'électricité en Belgique³³, le réseau de transport achemine l'électricité à haute tension allant de 70kV à 380kV.

Ce réseau est alimenté par des producteurs d'électricité à partir de grosses unités de production (centrales nucléaires, parcs offshore éoliens, etc.). C'est aussi par ce réseau que transitent les importations d'électricité provenant des pays voisins. Les centrales électriques fournissent leur puissance à une tension située aux alentours de 20 kV. La puissance (Watt) étant le produit de la tension (Volt) et de l'intensité (Ampère)³⁴, cette loi est primordiale afin d'assurer un transport efficace de l'électricité depuis la centrale de production jusqu'aux logements. Dans le but de transporter de grandes puissances sur de longues distances, la tension sera augmentée le plus possible dans les limites des isolants (et du coût d'infrastructure) avec des valeurs de 380 kV, 220 kV et 150 kV (Elia, s.d., pp. 3-5). De telles tensions permettent de réduire l'intensité et ainsi les pertes d'énergie et autres problèmes techniques liés à ces pertes, comme par exemple l'échauffement.³⁵ Ces très hautes tensions permettent d'interconnecter les centrales de production afin de transmettre la puissance de ces centres vers les points de charge les plus importants. Le transport est assuré par les câbles souterrains et lignes aériennes dont la figure 12 illustre les longueurs et tensions relatives (pour les années 2013 et 2014).

³² Seulement si la production d'électricité est totalement consommée. Dans le cas contraire, l'excédent d'électricité produite sera réinjecté dans le réseau.

³³ Voir Annexe 3 : « Flux d'électricité en Belgique en 2015 » pour une illustration de l'acheminement de l'électricité jusqu'au client final.

³⁴ Dans la réalité, il y a également un facteur de puissance à prendre en compte.

³⁵ Notamment du fait de l'effet Joule. Augmenter la tension plutôt que l'intensité permet aussi de véhiculer l'électricité à l'aide de câbles de section plus fine.

Figure 12 : Longueur du réseau HT en Belgique

Tension (kV)	Câbles souterrains (km)		Lignes aériennes (km)		Total (km)	
Elia	2014	2013	2014	2013	2014	2013
380	-	-	891	891	891	891
220	5	5	297	297	302	302
150	465	434	1.997	2.007	2.462	2.441
70	283	294	2.346	2.356	2.629	2.650
36	1.932	1.923	8	8	1.940	1.931
30	124	127	22	22	146	149
Total Elia	2.809	2.783	5.561	5.581	8.370	8.364

Source : http://www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/annual-report/digital-annual-report_2013/Rapport-Annuel_2013-le-groupe-elia.pdf

Comme dit précédemment, le monopole légal du transport d'électricité est détenu par le GRT belge, Elia. Ce dernier est responsable de la gestion du réseau de transmission, dont les tensions vont de 70 kV à 380kV, mais également du réseau de transport local dont les tensions vont de 30-36kV à 70kV. Les activités d'Elia sont contrôlées par la CREG³⁶ et régulées par le législateur fédéral pour le réseau de transmission tandis qu'elles sont sous supervision des autorités régionales pour le réseau de transport local.

Le GRT Elia est également responsable de la gestion des réserves. Afin qu'un équilibre soit préservé, trois types de réserves sont mises à disposition du GRT belge. La réserve primaire s'élève à 3.000 MW et doit pouvoir être délivrée en l'espace de quelques secondes. La réserve secondaire se situe aux alentours de 150 MW et réagit de manière automatique à un signal du système. Enfin, la Belgique a recours à la réserve tertiaire lorsqu'un événement radical survient (FEBEG, s.d.).³⁷

Pour ce qui concerne le développement des véhicules électrifiés sur le territoire belge, les spécialistes Elia interviewés dans le cadre du présent ouvrage sont formels : il n'y a, a priori, aucun risque à court et moyen terme quant au dimensionnement des infrastructures du réseau de transport. Ces propos n'ont pas été vérifiés mais les résultats de la modélisation tenteront tout de même de donner un aperçu de la pointe de

³⁶ Voir section « Régulation » pour plus d'informations.

³⁷ Comme par exemple la panne inattendue d'une grande unité de production.

charge globale que pourrait subir le réseau de transport suite au rechargement, en milieu résidentiel, de l'ensemble du parc de VE à l'horizon 2030.

4.3. Distribution

L'étape finale au processus d'alimentation des consommateurs domestiques en électricité consiste en sa distribution. Après diminution de la tension électrique réalisée par les transformateurs³⁸, l'électricité se trouve sur le réseau de distribution à HT/MT et MT/BT. Cette étape est assurée sur notre territoire par les Gestionnaires de Réseau de Distribution (GRD). Contrairement au GRT, il y en a une multitude sur le sol belge. En région de Bruxelles-Capitale, on retrouve un seul et unique GRD pour l'ensemble des communes, à savoir Sibelga. En région wallonne, le GRD principal est ORES car il y couvre la gestion d'approximativement 75% des communes, ce qui représente un total de 200 communes sur 262 (Callmepower, 2016). Le restant des communes étant principalement géré par Resa (groupe Tecteo), Régie de Wavre, AIESH et AIEG. Enfin, ce sont Eandis et Infrax qui ont le monopole de la distribution d'électricité pour la région flamande (Callmepower, 2015). Ils ont tous pour mission principale la gestion et l'entretien des réseaux de distribution électriques qui acheminent l'énergie jusqu'aux consommateurs (Resa, s.d.). C'est-à-dire de l'ensemble des réseaux dont la tension nominale se situe entre les basses tensions (220-230 volts) et moyennes tensions (30-36kV) ainsi que les installations connexes. Chacun des GRD dispose d'un monopole régulé dans la région où il est actif et distribue l'électricité sur le territoire pour lequel il a été désigné. Il y a également certains moyens de production décentralisés et de plus faible capacité qui sont raccordés au réseau de distribution (FEBEG, s.d.).³⁹

C'est sur les réseaux de distribution que les analyses des résultats de la modélisation, proposée dans le chapitre suivant, se porteront. Ces résultats et analyses se concentreront principalement sur les pointes de charge engendrées par le rechargement des VE en milieu résidentiel, et subies par les transformateurs HT/MT et surtout MT/BT.

³⁸ Voir Annexe 4 : « Transformateur 250 kVA » pour une illustration d'une plaque signalétique d'un transformateur 250 kVA ainsi que d'une fiche technique.

³⁹ Par exemple le photovoltaïque chez les professionnels et particuliers, certaines éoliennes onshore, etc.

4.4. Fourniture et Consommation

Les fournisseurs ont pour mission d'acheter l'électricité aux producteurs via le marché de l'électricité pour la revendre aux clients belges à un prix qu'ils fixeront en fonction des principes de libre concurrence (Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz [CREG], s.d.). En aucun cas ils ne gèrent la production d'électricité ni son transport.

Suite à la libéralisation du secteur électrique belge en 2007⁴⁰, le choix du fournisseur est laissé libre aux clients qui peuvent ainsi s'orienter en fonction des critères qui leur sont propres⁴¹ (Lilien, 2013, pp. 5-6). Les fournisseurs achètent l'électricité auprès des producteurs pour ensuite la revendre aux clients, tant professionnels que particuliers. L'opération d'achat s'effectue sur le marché de l'électricité, en Belgique et à l'étranger. Le fournisseur doit s'acquitter, en plus du prix de l'énergie, des taxes, des frais de transport ainsi que des frais de distribution pour le compte de l'Etat, du GRT et du GRD respectivement (FEBEG, s.d.).

4.5. Régulation

Il y a 4 régulateurs du marché de l'énergie en Belgique. On en distingue un par région, à savoir :

- La CWaPE (Commission Wallonne pour l'Energie) en Wallonie ;
- La VREG (Vlaamse Regulator van de Elektriciteits- en Gasmarkt) en Flandre ;
- BRUGEL (Bruxelles Gaz et Electricité) pour la région de Bruxelles-Capitale.

La Belgique dispose également d'un régulateur au niveau fédéral qui est la CREG (Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz).

Les régulateurs sont en charge du contrôle des prix de la distribution publique d'électricité. Leurs principales tâches consistent à assurer une transparence et une

⁴⁰ La libéralisation du marché de l'énergie en Flandre date de 2003, à Bruxelles et en Wallonie de 2007.

⁴¹ Comme par exemple le prix, le fait que l'électricité provienne de sources « vertes », etc.

concurrence sur le marché de l'énergie, à veiller à ce que la situation des marchés vise l'intérêt général et cadre avec la politique énergétique globale, à veiller aux intérêts essentiels des consommateurs et enfin à donner des conseils aux autorités en matière énergétique (Synergrid, 2016).

5. Proposition de modélisation de la recharge d'une flotte de VE

On l'a dit, les véhicules électrifiés⁴² deviennent de plus en plus populaires. Leur recharge engendre une consommation d'énergie non négligeable. Cette demande d'énergie électrique pourrait cogénérer des pics de consommation qui auraient forcément un impact sur la courbe de charge⁴³, le risque étant qu'elle soit concentrée sur certaines heures de la journée pouvant dès lors créer, à l'échelle locale, des problèmes de réseau. Il est donc indispensable, dans un contexte où le comportement statistique du consommateur vis-à-vis de son VE n'est pas encore tout à fait connu, d'anticiper cette menace afin d'éviter un renforcement trop important des réseaux électriques.

Tenter de représenter au mieux le nombre de véhicules électriques prochainement sur les routes belges ainsi que leur utilisation n'est pas une tâche aisée tant les habitudes de vie sont propres à chaque individu. En prenant l'exemple d'un résident belge qui parcourt 15.000 km par an à l'aide de son véhicule et qui ne le recharge qu'à son domicile, l'utilisation du VE ferait passer sa consommation électrique annuelle de 3.500 kWh à grosso modo 6.200 kWh.⁴⁴ Bien que cette différence soit considérable à l'échelle du privé, une forte pénétration des véhicules électrifiés ne ferait que conduire à une hausse modérée de la demande totale en électricité. Des études montrent en effet qu'avec un taux élevé de 20% de VE qui composeraient la flotte totale de VE sur les routes européennes à l'horizon 2020, la demande d'électricité supplémentaire associée serait de 3% à 4% (McKinsey & Company, & Amsterdam Roundtables Foundation, 2014).

D'après les données et caractéristiques des VE présentées dans le deuxième chapitre, il semble plus que légitime de se poser la question de l'impact de la recharge⁴⁵ d'un certain nombre de VE sur l'infrastructure du réseau électrique belge. Des questions du type « Que se passe-t-il si des centaines, voire des milliers, d'automobilistes décident de brancher leur véhicule au même moment de la journée ? Le réseau de distribution peut-

⁴² Véhicules électriques purs et véhicules hybrides rechargeables = VE

⁴³ Voir Annexe 5 : « Exemple d'une courbe de charge » pour une illustration réelle de courbe de charge.

⁴⁴ En supposant une consommation électrique moyenne d'approximativement 0,18 kWh/km.

⁴⁵ En milieu résidentiel uniquement.

il supporter une telle charge ? Est-il suffisamment dimensionné ?, etc. » ne reposent pas spécifiquement sur le volume de demande d'électricité mais plutôt sur la potentielle augmentation de la pic de demande qui est dépendante de la puissance, de la localisation ainsi que du moment de la recharge.

Selon les experts Elia (GRT) interviewés dans le cadre de ce présent ouvrage, le réseau de transport ne serait pas susceptible d'être menacé par la recharge des VE.⁴⁶ Cependant, l'attention doit se tourner vers les réseaux de distribution et leur infrastructure. Deux composantes principales du système de distribution électrique belge, à savoir les transformateurs de puissance et les câbles (et lignes), risquent en effet d'être impactées face au déploiement de l'électromobilité. Les analyses proposées dans le chapitre suivant se concentreront plus particulièrement sur les pointes de charge subies par les transformateurs propres au réseau de distribution.

Les deux lieux principaux sur lesquels les VE peuvent être rechargés sont les endroits semi-publics et publics (parkings d'entreprises, parkings publics, etc.) et à domicile. La modélisation proposée dans ce présent ouvrage se concentrera uniquement sur la recharge à domicile en se focalisant plus précisément sur les heures de la journée pendant lesquelles les automobilistes sont le plus susceptibles de recharger le VE, à savoir les heures de retour au domicile après une journée de travail (en période de jours ouvrables, du lundi au vendredi). Les périodes de week-ends et jours fériés ne feront dès lors pas l'objet d'une modélisation pour la charge du réseau.⁴⁷ Seules les consommations d'énergie électrique des VE durant ces jours non ouvrables seront donc prises en considération.⁴⁸

Afin de quantifier cet impact, la méthode construite et utilisée dans cet ouvrage tentera d'établir les différents profils des utilisateurs du VE. Ces profils déterminent l'usage du

⁴⁶ Ces affirmations n'ont cependant pas été vérifiées dans le cadre de ce présent mémoire. Seule une approximation de la pointe de charge susceptible de se produire sur le réseau de transport fera l'objet d'une simulation.

⁴⁷ Un manque de statistiques détaillées concernant les habitudes des automobilistes durant les jours non ouvrables poussent à restreindre l'évaluation des pointes de charge, liées aux rechargements des VE à domicile, seulement pour les jours ouvrables.

⁴⁸ Afin de quantifier la consommation totale annuelle d'électricité qu'implique une flotte de VE.

VE qui est fait par les automobilistes. Enfin, ce sont ces usages qui conditionnent le besoin de recharge d'un VE, et par extension, de celui d'une flotte de VE.

Quant au profil de recharge d'un véhicule électrifié, il s'articule autour de trois éléments clés :

- L'heure de recharge du véhicule ;
- La quantité d'énergie à fournir ;
- La puissance de recharge.

Les sections qui vont suivre tenteront dans un premier de temps de décrire au mieux les paramètres et hypothèses utilisés dans le cadre de la modélisation, et ce, afin de construire les profils de charge (uniquement pour le cas de la recharge à domicile). Dans la première section seront décrits les profils types des usagers retenus dans cette étude ainsi que leurs habitudes de roulage⁴⁹. De cette section sera déduit le premier paramètre propre au profil de charge : l'heure de rechargement des VE. La section suivante définira les paramètres propres aux deux éléments manquants à la construction du profil de charge : la quantité d'énergie à fournir et la puissance de recharge. Elle donnera un exemple de profil de charge pour deux VE dont les paramètres utilisés sont ceux décrits dans cet ouvrage. Ensuite, une section sera dédiée aux principales limites de la modélisation proposée. Par après, un tour d'horizon rapide des solutions possibles face aux menaces apportées par le rechargement des véhicules électrifiés sera introduit. Les solutions abordées, qui font actuellement l'objet d'études avancées, concernent principalement les systèmes V2G (Vehicle-to-Grid) et V2H (Vehicle-to-Home). Pour clôturer ce chapitre, la dernière section portera sur les hypothèses principales qui ont été posées ainsi que sur certaines hypothèses additionnelles. La dernière section de ce chapitre consistera donc en un récapitulatif, avec certaines précisions, de ce qui a été pris en considération dans l'objectif de construction du modèle.

⁴⁹ Principalement les heures les plus « exposées » à la recharge des VE ainsi que les distances moyennes parcourues.

5.1. Profils des automobilistes et habitudes de roulage

Modéliser le comportement des automobilistes n'est pas une tâche facile tant le comportement de chaque individu lui est propre. Cependant, il est possible, en partie grâce aux données fournies par la FEBIAC (2016) et par le rapport d'étude BELDAM⁵⁰ (Cornelis, 2010), de tirer certaines tendances sur les habitudes des automobilistes.

Les habitudes de roulage des automobilistes « électriques » découlent directement de celles qui ont pu être observées avec les véhicules thermiques classiques. Aucune modification quant à ces habitudes ne sera considérée dans le cadre de cette modélisation, bien que certaines études révèlent une modification des habitudes de roulage suite au passage à l'électromobilité, et plus particulièrement au développement des infrastructures de recharge.⁵¹

L'usage du véhicule, qu'il soit à combustion interne ou électrique, est supposé être le même. Un automobiliste a recours à son véhicule pour effectuer divers déplacements : se rendre au travail, rendre visite à un proche, faire des courses, du shopping, ses loisirs, se rendre aux cours, retourner à son domicile, etc. Tous ces motifs de déplacement sont effectués de manière quotidienne par bon nombre d'automobilistes. Pourtant, un seul motif parmi tant d'autres est propre à une seule et unique catégorie d'automobilistes. Le déplacement dont le motif principal est celui de se rendre au lieu de travail est le seul à être commun à la population de « travailleurs ». Pour tous les autres motifs de déplacement, ils peuvent concerner plusieurs catégories d'automobilistes à la fois.

Dans l'optique de répartir le parc de VE en fonction du type d'usager (et donc de l'usage qu'un automobiliste peut faire du véhicule), il semble dès lors logique de considérer la catégorie d'automobilistes « travailleurs » comme sujette à une catégorie unique d'utilisateur et propriétaire de VE.

Le critère de répartition de la flotte de véhicules électrifiés en Belgique qui sera retenu dans le cadre de la modélisation est donc basé sur les motifs de déplacement, et, par extension, sur « le type d'usager ».

⁵⁰ BELDAM est l'abréviation de « Belgian Daily Mobility ».

⁵¹ Une étude japonaise de 2008 révèle que le nombre de kilomètres parcourus augmente rapidement après l'installation d'un large réseau de points de recharge rapide (Fédération Belge de l'Automobile et du Cycle [FEBIAC], 2011, p.7).

Deux types d'utilisateurs seront dès lors considérés dans cette étude :

- Les travailleurs (catégorie 1) ;
- Les utilisateurs de type « divers » (catégorie 2). Cette catégorie regroupe tous les autres types d'automobilistes tels que les personnes âgées, les personnes à la retraite, les étudiants en possession d'un permis de conduire, les femmes au foyer, etc.

Les habitudes comportementales (distance parcourue, heure de recharge, heure de départ du domicile, etc.) de chacun de ces deux types d'utilisateurs leur sont propres, du moins pour les jours ouvrables de la semaine. Les trajets effectués durant les week-ends sont considérés comme davantage 'aléatoires'. Comme il a été décrit dans la section « L'état actuel du marché belge », le parc automobile électrifié belge est majoritairement détenu par des entreprises, à hauteur de 83% (Cornelis, 2010). Ce critère de répartition est ainsi retenu et permet d'émettre l'hypothèse que 83% du parc de VE est attribuable à la catégorie des travailleurs. Toutefois, cette répartition sera ajustée à 85% afin de prendre en compte la part relative aux travailleurs utilisant un véhicule électrifié sans lien quelconque avec une entreprise (contrat de leasing ou autre). Les 15% constituant le restant du parc automobile électrique est à attribuer aux automobilistes du type « divers ».

Les trois points qui vont suivre seront dédiés à la description successive des caractéristiques propres aux travailleurs, à la catégorie d'automobilistes de type « divers » et enfin aux caractéristiques communes aux deux catégories.

- Caractéristiques propres à la catégorie 1 :

Sont considérés comme « travailleurs », toute personne rétribuée pour fournir un travail au sein d'une entreprise ou d'une administration (Wikipédia, 2005).

Les travailleurs sont supposés, dans le cadre de la modélisation, effectuer uniquement un trajet domicile - lieu de travail / lieu de travail – domicile, et ce, chaque jour ouvrable de la semaine. Ils ont dès lors la possibilité de recharger le véhicule sur le lieu de travail, en cas de disponibilité d'une borne de recharge, et à domicile, si ceux-ci possèdent un emplacement pour recharger le véhicule. L'étude BELDAM (Cornelis, 2010) rapporte

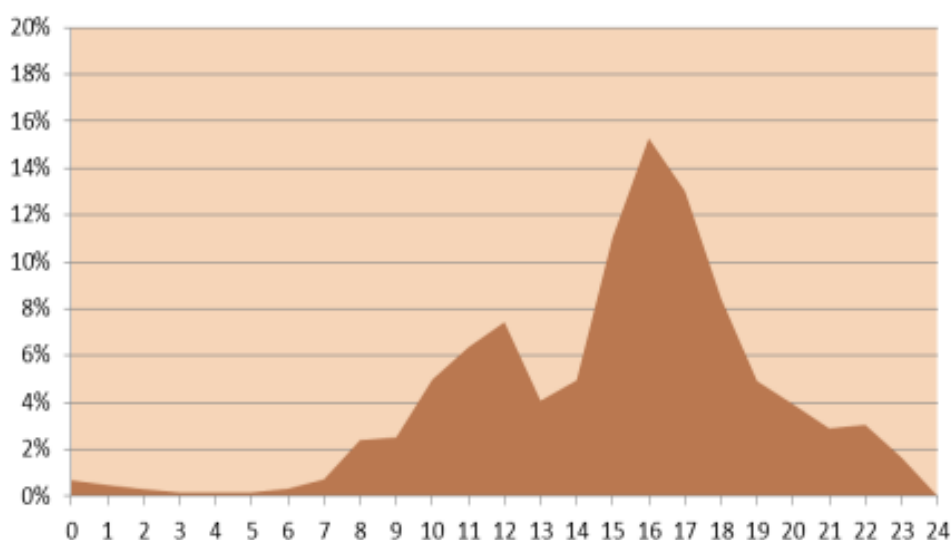
qu'en Belgique, 64% des ménages parquent leur(s) véhicule(s) dans un garage ou un box dont ils disposent, alors que 36% des ménages stationnent leur(s) véhicule(s) sur la rue. Cette statistique sera dès lors reprise et «appliquée» à la catégorie des travailleurs afin d'émettre l'hypothèse que 36% de ceux-ci ne possèdent pas d'emplacement permettant le rechargement à domicile, faute d'espace disponible (garage, parking ou autre). Comme il a déjà été dit, ce présent ouvrage tente de fournir une modélisation pour la recharge à domicile uniquement. Pour cette raison, seules les recharges des 64% de VE appartenant à la catégorie des travailleurs seront prises en considération dans l'évaluation de l'impact du rechargement des VE sur les réseaux. Les 36% restants étant rechargés à l'aide de bornes de recharge localisées sur le lieu de travail ou via des bornes de recharge publiques.⁵²

La distance moyenne entre le lieu de travail et le domicile s'élève à 22km en Belgique (Cornelis, 2010). Il est ainsi convenu que pour 64% des travailleurs, une recharge quotidienne à domicile sera opérée afin de recouvrer l'entièreté de l'énergie consommée par les 44km parcourus.

Pour ce qui concerne les heures de déplacement des travailleurs, ceux-ci sont supposés prêter des journées complètes de travail. Le travail à mi-temps ne sera dès lors pas considéré dans cette étude, ceci trouvant justification dans le fait qu'en général, les travailleurs mi-temps ne disposent pas de voiture de société. Le profil horaire pour les déplacements dont le motif concerne le retour à domicile (voir figure 13) permet de définir une tranche horaire durant laquelle les travailleurs sont susceptibles de brancher leur VE afin d'en effectuer la recharge.

⁵² Selon le site de référence Chargemap (2016), il y a actuellement 14% des bornes de recharge publiques qui se situent aux entreprises et 29,2% sur les parkings publics. Ces bornes de recharge proposent généralement des puissances de recharge plus élevées que celles utilisées à domicile.

Figure 13 : Répartition horaire des déplacements un jour moyen pour le motif "retour à la maison"



Source : http://www.beldam.be/Rapport_final.pdf

On constate que la plus grande densité des déplacements pour le motif « retour à la maison » se situe entre 14H30 et 18H30 (pointe à 16H). Un petit pic entre 11H et 12H est également constaté. Il ne sera cependant pas pris en compte dans le cadre de la modélisation, la justification étant que la modélisation tente de fournir les situations les plus critiques pouvant survenir vis-à-vis des infrastructures du réseau de distribution. C'est pourquoi, seul le cas dans lequel la plus grande densité de VE est susceptible d'être rechargée fera l'objet d'une modélisation. En effet, si l'infrastructure des réseaux de distribution est suffisamment conçue que pour pouvoir supporter la pointe de charge survenant lors des « plus grands pics », nul doute qu'elle sera capable de supporter les pointes de consommation à plus petite échelle.

Un détail, pour le moins non négligeable, concerne le fait que l'analyse permettant de fournir ces horaires de déplacement est réalisée en prenant en compte uniquement l'heure de départ des déplacements (et non l'heure d'arrivée au domicile). La distance moyenne séparant le lieu de travail et le domicile étant de 22km et la vitesse moyenne de déplacement suivant que l'on est conducteur d'un véhicule étant de 46km/h (Cornelis, 2010), le temps mis pour effectuer ce trajet est d'approximativement 29 minutes. Il est dès lors convenu que 30 minutes seront nécessaires afin de parcourir cette distance et de brancher le véhicule à la borne de recharge. La tranche horaire

pendant laquelle les travailleurs seront le plus à même de brancher leur VE au réseau devient donc de 15H à 19H, avec une pointe à 16H30. La même répartition de retour à domicile que celle observée dans la figure 13 sera utilisée dans le cadre de la modélisation pour la catégorie de travailleurs, majorée des 30 minutes nécessaires au déplacement et au branchement du VE à la borne. La figure 14 illustre la répartition horaire du rechargement des VE aux bornes de recharge à domicile considérée dans cette étude.

Figure 14 : Répartition horaire des rechargements de VE aux bornes de recharge à domicile

15h	15h30	16h	16h30	17h	17h30	18h	18h30	19h
7,5%	10%	12%	15%	14%	13%	12%	9%	7,5%

➤ **Caractéristiques propres à la catégorie 2 :**

La catégorie d'automobilistes de type « divers » englobe différents profils d'utilisateurs (étudiants en possession d'une licence, femmes au foyer, personnes à la retraite, etc.). Les habitudes de roulage propres à ceux-ci sont de ce fait bien plus complexes à modéliser tant elles sont nombreuses, aléatoires et dépendantes de chaque individu. Cependant, comme nous le verrons plus tard dans la section relative aux résultats du modèle, le fait que cette catégorie ne concentre qu'une partie restreinte de la flotte de VE (15%), l'impact du rechargement de ces VE en milieu résidentiel est moindre en comparaison à l'impact engendré par les VE appartenant aux travailleurs. C'est pourquoi, cette part de 15% du parc automobile électrifié détenue par la catégorie d'automobilistes « divers » sera utilisée afin de faire varier le modèle. En prenant le cas le plus défavorable où cette deuxième catégorie d'automobilistes décide de brancher le VE à domicile durant la même tranche horaire que les 64% faisant partie de la catégorie des travailleurs, c'est-à-dire entre 15H et 19H, on obtiendra de la sorte le scénario le plus critique susceptible d'exister dans le cadre de la modélisation à l'échelle du réseau national⁵³.

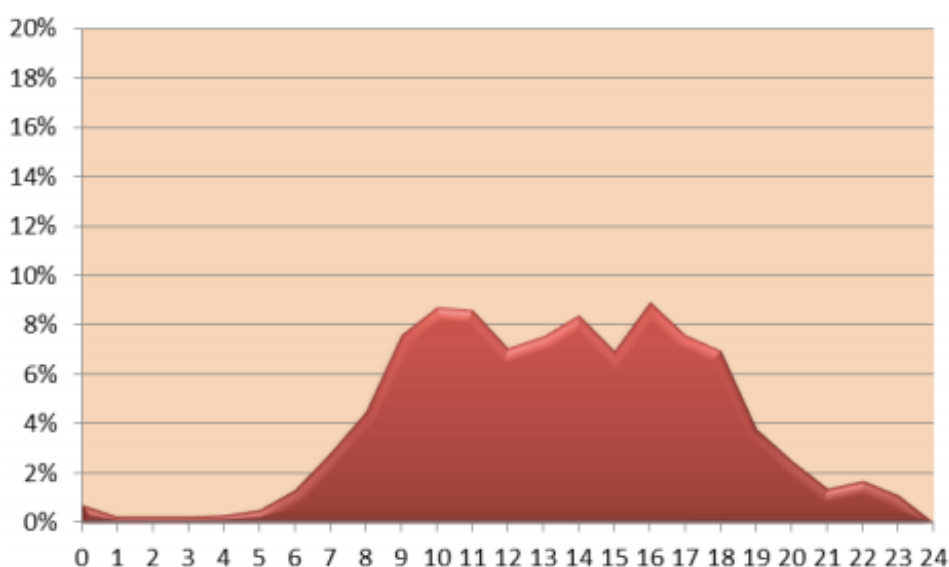
⁵³ En utilisant la même répartition horaire que celle valable pour les travailleurs (voir figure 14).

En ce qui concerne la distance moyenne parcourue par chaque VE durant les jours ouvrables, c'est celle estimée par la FEBIAC (2016) qui sera retenue, à savoir 40,6km.⁵⁴

➤ Caractéristiques communes aux deux catégories :

Le cas des jours non ouvrables est tout à fait différent de celui des jours ouvrables. Il sera supposé semblable pour les deux catégories d'automobilistes. La répartition horaire des déplacements pour les jours fériés et week-ends est donnée par la figure 15.

Figure 15 : Répartition horaire des déplacements un jour férié ou de week-end



Source : http://www.beldam.be/Rapport_final.pdf

Il est difficile de dégager une tendance nette de ces heures de déplacement. En effet, la répartition horaire s'étale sur une période allant de 8H à 19H (Cornelis, 2010). Raison pour laquelle en périodes de week-ends et jours fériés, les recharges de VE seront considérées comme temporellement aléatoires pour les deux catégories d'automobilistes. L'heure de recharge des VE se fera donc aléatoirement durant la journée, entre 8H et 19H.⁵⁵ Un pic est de ce fait susceptible de survenir à tout moment de la journée, durant les week-ends ou les jours fériés, si un nombre conséquent de VE sont branchés sur le réseau au même moment. De par ce côté purement aléatoire, notre modélisation ne tentera pas de fournir une estimation des pointes de charge pouvant survenir pendant les week-ends et jours fériés.

⁵⁴ Distance moyenne parcourue par personne et par jour en Belgique.

⁵⁵ On ne suppose pas de recharge en fonction du signal tarifaire (voir hypothèses).

La distance moyenne parcourue par les deux types d'utilisateurs, durant les week-ends et jours fériés, est calculée au moyen des données fournies par la FEBIAC (2016) et par l'étude BELDAM (Cornelis, 2010). Elle équivaut à 13,1 km alors que le nombre moyen de déplacements est de 3,31.⁵⁶ On considérera dès lors que chaque VE parcourra une distance d'approximativement 43km par jour, en période de jours non ouvrables.

- Afin de clarifier ce qui a été établi dans cette section propre aux catégories d'utilisateurs du VE ainsi que de leurs habitudes de roulage (distance parcourue quotidiennement⁵⁷ et tranches horaires de rechargement des VE), la figure 16 reprend les principales données considérées qui seront utilisées dans le cadre de la modélisation.

Figure 16 : Récapitulatif des habitudes de roulage considérées dans cette étude

Catégorie d'automobilistes	Distance Parcourue (Jours Ouvrables)	Distance Parcourue (Jours fériés et W-E)	Tranche horaire de Rechargement du VE (Jours Ouvrables)	Tranche horaire de Rechargement du VE (Jours fériés et W-E)
1	44km (pour 64%) ⁵⁸	43km	15H – 19H	Aléatoire (de 8H à 19H)
2	40,6km	43km	Aléatoire ⁵⁹	Aléatoire (de 8H à 19H)

⁵⁶ La distance parcourue est celle estimée par le rapport d'étude BELDAM (Cornelis, 2010) et concerne les week-ends et jours fériés. Le nombre de déplacements effectués par jour correspond aux statistiques fournies par la FEBIAC pour n'importe quel jour de la semaine. Des statistiques concernant le nombre de déplacements durant les jours non ouvrables n'étant pas disponibles.

⁵⁷ La distance parcourue par un VE est supposée remise à 0 une fois la recharge du VE effectuée. Ce qui signifie qu'une fois branchée, la batterie du VE sera à chaque fois rechargée jusqu'au maximum de sa capacité afin de bénéficier d'une autonomie maximale.

⁵⁸ Comme il a été dit auparavant, 64% des automobilistes de la catégorie 1 disposent d'un emplacement à domicile permettant la recharge du VE.

⁵⁹ Sauf dans le cas de la simulation pour la situation la moins favorable au réseau de transport électrique. Dans ce cas, les 15% de la flotte de VE détenus par la catégorie « divers » seront rechargés entre 15H et 19H, selon la même répartition que celle décrite à la figure 14.

5.2. Modélisation du profil de charge

Les heures de la semaine les plus susceptibles d'être exposées à une recharge, en période de jours ouvrables, ayant été spécifiées au moyen des habitudes des automobilistes, il convient à présent de définir les deux éléments manquants à la construction du profil de charge : la quantité d'énergie à restituer et la puissance de recharge à laquelle seront soumis les VE.

Tout comme les véhicules thermiques classiques ont besoin de carburant pour se déplacer, il convient pour les VE de faire l'appoint en énergie électrique. Pour ce faire, il est nécessaire de brancher le véhicule électrifié à un point de recharge. La borne de recharge fournira dès lors l'énergie dont le VE a besoin. La durée de rechargement nécessaire afin de restituer l'autonomie complète du véhicule est dépendante du niveau d'énergie qui a été consommée par le VE ainsi que de la puissance de recharge délivrée par la borne de rechargement. Au plus le nombre de kilomètres parcourus par le VE est élevé, au plus il faudra fournir de l'énergie à la batterie pour la recharger totalement. De même qu'au plus la puissance de recharge délivrée par la borne est élevée, au plus court sera le temps mis pour recharger le VE. Comme vu précédemment dans les sections relatives aux bornes de recharge et aux modes de recharge, il existe une variété d'alternatives allant de la borne de recharge lente à la borne de recharge rapide. Ce présent ouvrage se consacrant uniquement au cas du rechargement des VE en milieu résidentiel⁶⁰, seulement trois puissances de recharge seront considérées :

- Recharge à 2,3 kW (10A, 230V) au moyen d'une prise domestique ;
- Recharge à 3,7 kW (16A, 230V) au moyen d'une Wallbox;
- Recharge à 7,4 kW (32A, 230V) au moyen d'une Wallbox.⁶¹

Le profil de charge des VE est défini comme la puissance de charge qui est absorbée par ces véhicules en fonction du temps. Celui d'une flotte de véhicules électrifiés est

⁶⁰ Bien qu'il soit supposé que 36% de la flotte de VE appartenant aux « travailleurs » soit rechargée sur le lieu de travail ou aux emplacements publics au moyen de bornes de recharge certainement plus rapides.

⁶¹ Comme vu dans la section « Les bornes de recharge », les câbles fournis avec les VE ne permettent qu'une intensité de recharge de maximum 10A. C'est pourquoi il faudra compter sur une Wallbox pour recharger avec des intensités supérieures en milieu résidentiel.

simplement égal à la somme des profils de charge individuels. Une fois les profils de charge des deux catégories d'automobilistes prédéfinis, il conviendra donc de les additionner afin d'obtenir le profil de charge global de la flotte de VE.⁶²

On distingue principalement trois profils de charge (Réseau de Transport d'Électricité [RTE], 2014, p. 53) :

- Profil de charge naturelle : Les VE sont rechargés en fonction du besoin, sans contrainte réglementaire ni incitation tarifaire pour décaler les heures de recharge. L'impact sur la pointe journalière est particulièrement marqué dans ce cas-ci ;
- Profil « signal tarifaire » : L'incitation tarifaire pousse les automobilistes à brancher leur VE pendant les heures creuses ;
- Profil « BMS⁶³ » (charge intelligente) : Une partie des recharges est effectuée en mode BMS, avec un report encore plus marqué sur les heures nocturnes. Un pilotage de la charge est donc rendu possible dans ce troisième type de profil de charge.

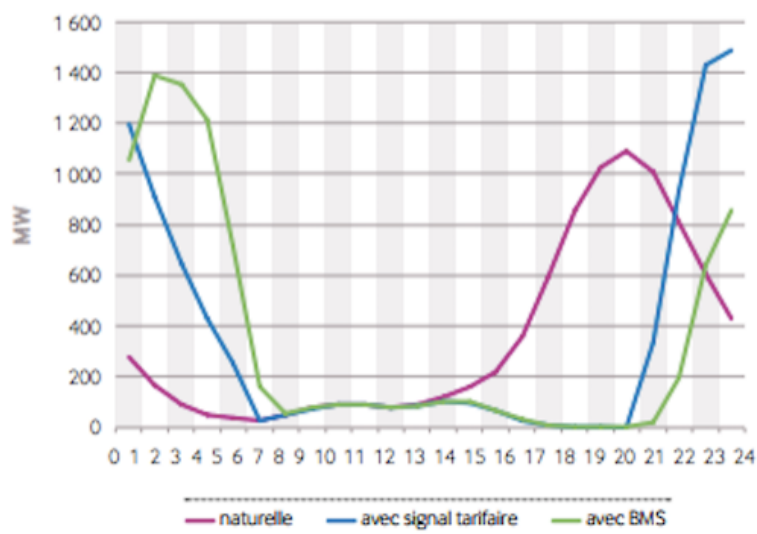
Suivant le profil de charge considéré, la courbe de charge aura un impact différent sur l'équilibre du système électrique.

La figure 17 donne un exemple de trois courbes de charge pour une flotte d'un million de véhicules électrifiés et pour un jour ouvrable du mois de janvier⁶⁴.

⁶² Sans oublier que le niveau de la puissance de recharge a bien entendu un impact sur la forme du profil de recharge d'une flotte de véhicules électrifiés.

⁶³ Battery Management System (BMS) : il s'agit d'un système de gestion de la charge assurant à l'utilisateur de disposer d'une pleine charge quand il en a besoin, tout en optimisant la recharge, par fractionnement pendant les heures creuses.

Figure 17 : Courbes de charge suivant le profil de charge considéré



Source : http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_complet_2014.pdf

Pour construire les profils de charge propres à la flotte de VE en Belgique, il convient dans un premier temps de répartir, de manière purement arbitraire⁶⁵, les différentes puissances de recharge en fonction des catégories d'automobilistes :

- Pour les « travailleurs » :
 - 50% des recharges à une puissance de 2,3 kW ;
 - 25% des recharges à une puissance de 3,7 kW ;
 - 25% des recharges à une puissance de 7,4 kW.

- Pour la catégorie « divers » : La même répartition que celle appliquée aux automobilistes de la catégorie 1 sera d'application.

Passons maintenant aux temps de recharge nécessaires afin de reconstituer l'entière autonomie de l'autonomie dont disposent les VE. En supposant une recharge dont l'efficacité est optimale et dont la puissance est constante sur toute la durée de la recharge, on obtient des durées de rechargement qui varient selon deux facteurs : la puissance de recharge et la quantité d'énergie qu'il convient de fournir à la batterie. Dans le cadre de la modélisation, il est supposé que la consommation moyenne des véhicules électrifiés est

⁶⁵ Aucune données statistiques concernant la répartition des puissances de charge en milieu résidentiel n'étant actuellement disponibles.

de 22kWh/100km et ne variera pas d'ici 2030⁶⁶. Les distances parcourues, lors des jours ouvrables, par chacun des automobilistes de la catégorie 1 étant de 44km et par chacun de ceux de la catégorie 2 étant de 40,6km, cela donne une consommation de 9,68 kWh (0,22 kWh multiplié par 44) et 8,932 kWh (0,22 kWh multiplié par 40,6), respectivement. En prenant en compte ces différents paramètres, on obtient les durées de rechargement décrites à la figure 18⁶⁷.

Figure 18 : Durée de rechargement d'un VE selon la catégorie d'automobiliste et la puissance de charge considérées

Catégorie d'automobiliste	Durée recharge à 2,3kW (pour 50%)	Durée recharge à 3,7kW (pour 25%)	Durée recharge à 7,4kW (pour 25%)
1	4h13min	2h37min	1h19min
2	3h53min	2h25min	1h12min

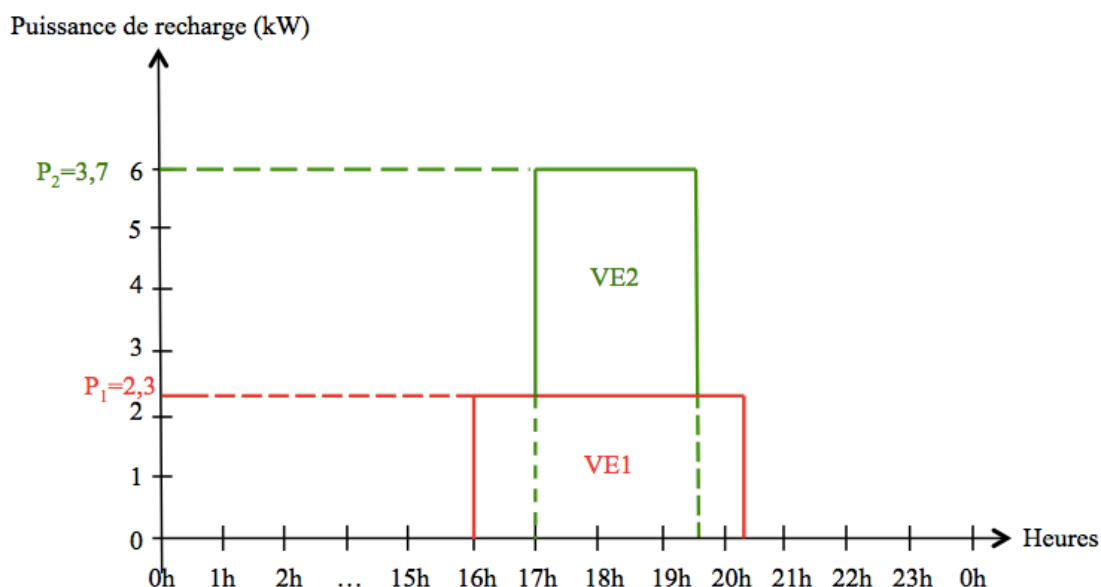
Connaissant les puissances de charge, les durées nécessaires pour un rechargement complet ainsi que les heures de branchement des VE, les profils de charge d'une flotte de VE peuvent être construits. La figure 19 en donne une illustration au travers d'un graphe, pour deux VE (VE1 et VE2) appartenant aux automobilistes de la catégorie 1 et étant mis en recharge à 16H et 17H à une puissance de recharge de 2,3kW et 3,7kW respectivement, en période de jours ouvrables⁶⁸.

⁶⁶ Les estimations quant à la consommation des véhicules électriques fournies par le Bureau fédéral du Plan et le Service public fédéral Mobilité et Transports (2012) sont de 22,75 kWh/100 km jusqu'en 2025 et 21,76 kWh/100km pour la période allant de 2025 à 2030 (Voir Annexe 6 : « Perspectives d'évolution de la consommation moyenne de carburant et d'électricité par type de voitures »). C'est pourquoi une approximation de 22 kWh/100km semble tout à fait raisonnable jusqu'à l'horizon 2030.

⁶⁷ Comme il a déjà été mentionné, seuls les temps de rechargement durant les jours ouvrables seront considérés. Les rechargements survenant les week-ends et jours fériés étant totalement aléatoires dans le temps, ils ne feront pas l'objet d'un profil de charge.

⁶⁸ La pointe de charge relative aux chargements des deux VE vaut donc 6kW (2,3kW + 3,7kW), entre 17h et 19h37.

Figure 19 : Exemple d'un profil de charge pour deux VE



La charge totale supportée par l'infrastructure du réseau électrique relative au secteur résidentiel est équivalente à la somme de la consommation résidentielle, c'est-à-dire pour un usage domestique, et de la consommation pour la recharge des VE. Dans le cas où cette consommation relative aux VE n'est pas coordonnée à l'échelle locale, des éventuels problèmes de réseau pourraient survenir. La modélisation tentera dès lors de procurer un aperçu des pics de consommation susceptibles de survenir à l'échelle locale, pour le secteur résidentiel.

5.3. Principales limites de la modélisation proposée

La méthode proposée dans cet ouvrage, et dont l'objectif est l'estimation de l'impact du rechargement des VE en milieu résidentiel sur le réseau électrique, présente des limites liées à certaines hypothèses qui ont été formulées dans le but de rendre cette méthode possible. Voici les principales limites de cette méthode :

- Seul un usage du VE a pu être défini de manière plus précise, celui du trajet effectué entre le domicile et le lieu de travail. Bien entendu les trajets dans la réalité sont beaucoup plus complexes et ne se limitent pas seulement à un aller-

retour / travail-domicile en période de jours ouvrables. Il est cependant extrêmement complexe de saisir l'ensemble des comportements qui induisent la recharge naturelle considérée dans cette modélisation. C'est pourquoi, l'usage des VE, pour la catégorie d'automobilistes « divers » ou pour les travailleurs qui sortent du cadre prédéfini (par exemple ceux qui travaillent avec des horaires décalés), a été fortement simplifié.

- Ce modèle attribue la majeure partie de la flotte de VE sur nos routes aux automobilistes de type « travailleurs ». Dans la réalité, cette répartition pourrait être tout autre.
- Seules les recharges à domicile ont été considérées, ce présent mémoire se consacrant uniquement à l'impact des recharges de VE en milieu résidentiel. Dans la réalité et à l'horizon 2030, les bornes publiques devraient constituer une alternative beaucoup plus développée et présente qu'elle ne l'est aujourd'hui. D'après une étude menée par Nègre (2011, pp. 31-37), 90% des recharges de VE en France devraient survenir à domicile ou sur le lieu de travail. Les bornes de recharge publiques présentant généralement des puissances de recharge plus élevées, il est fort probable que les pointes de consommation, qui vont être simulées dans le chapitre suivant, soient plus élevées si la modélisation avec pris en compte ces bornes de recharge publiques.
- La recharge des VE proposée dans ce modèle est concentrée sur une période de la journée (en période de jours ouvrables) allant de 15h à 19h. Dans la réalité, les rechargements de VE peuvent survenir à toutes heures de la journée. Cependant, d'après la répartition des heures de retour à la maison proposée par l'étude BELDAM (Cornelis, 2010), la probabilité que la majorité des rechargements se fassent durant la tranche horaire proposée dans ce modèle est grande (du moins pour les travailleurs en période de jours ouvrables).
- Deux types de recharge, l'une se faisant en fonction du signal tarifaire, l'autre de type recharge intelligente, ne sont pas pris en considération dans cette modélisation. Cependant, il est évident que certains automobilistes privilégieront la recharge lorsque le prix de l'électricité est au plus bas dans la journée. Il est

aussi évident que la recharge intelligente risque de bouleverser les profils de charge des véhicules électrifiés.⁶⁹

- Dans la pratique, on ne peut calculer l'énergie absorbée par une batterie en charge par la simple multiplication de la puissance du courant délivré, par le nombre d'heures de charge. Il faut déduire la perte d'énergie du chargeur, et considérer ensuite que la charge d'une batterie n'est pas un processus parfaitement linéaire (Masson, 2013).
- La production locale d'électricité, au moyen de panneaux photovoltaïques par exemple, n'est pas prise en considération. Cependant, ce type de production permet de soulager la charge du réseau. Tous les éléments qui permettent « d'alléger » la charge du réseau n'ont pas été considérés.
- Les relevés de puissance de charge s'effectuent toutes les 30 minutes. Il en résulte un certain manque de précision. Pour les données propres au domaine de l'électricité, les relevés de charge se font par quart horaires, c'est-à-dire toutes les 15 minutes.
- Les recharges sur les parkings d'entreprises n'ont pas été considérées. Il est évident que celles-ci risquent d'impacter fortement le réseau car elles seront concentrées sur un même emplacement et à des moments précis de la journée.
- Dans la pratique, la consommation électrique des VE varie en fonction des saisons. La modélisation proposée dans ce travail a supposé une consommation fixe de 0,22 kWh / 100 km pour les quatre saisons de l'année.

5.4. Smart Grid : V2G et V2H

Un VE peut considérablement augmenter, à lui seul, la demande de pointe en électricité d'un ménage. De ce fait, il est crucial de gérer au mieux le chargement du véhicule électrifié, et par extension, d'une flotte de VE. Cette section évoque quelques solutions (d'actualité) qui visent à soulager les infrastructures du réseau électrique en « lissant » les pics de consommation relatifs à la recharge des véhicules électrifiés.

⁶⁹ Voir section « Smart Grid : V2H et V2G » pour plus d'informations.

Les « Smart Grids » ou réseaux intelligents offrent la possibilité d'une utilisation plus efficace de la nouvelle génération de VE. Sans rentrer dans des détails trop pointus, les Smart Grids permettent de mieux insérer le VE dans le système électrique en offrant une gestion « intelligente » de la recharge des véhicules électrifiés grâce à un « pilotage » de la charge. Les réseaux intelligents fournissent le contrôle nécessaire afin de protéger les composants du réseau de distribution, comme par exemple les transformateurs, en évitant qu'ils soient surchargés notamment lors de l'approvisionnement des VE (Silver Spring Networks, s.d.). Les technologies Smart Grids assureront donc que le véhicule électrifié soit toujours rechargé tout en effectuant ce rechargement au moment le plus optimal (SmartGrid.gov, s.d.).

De par leur caractère bidirectionnel ⁷⁰, les véhicules rechargeables s'intègrent parfaitement dans la recherche relative aux réseaux intelligents (Smart Grids) et ouvrent la voie à deux nouveaux systèmes : le Vehicle-to-Grid (V2G) et le Vehicle-to-Home (V2H).

Le système V2G donne un tout autre aperçu de l'utilisation possible des véhicules électrifiés. Il place le VE non plus uniquement au service des utilisateurs mais aussi au service des réseaux électriques. En effet, au lieu de considérer les VE prochainement sur les routes comme une menace concernant les pics de consommation qu'ils vont engendrer, une alternative serait de les utiliser afin de stocker à un prix efficace des quantités adaptées d'électricité, permettant ainsi de concilier l'offre et la demande dans le système électrique (Kempton, & Tomić, 2004, pp. 2-4).

Ceci permettrait donc d'enlever au système électrique sa caractéristique négative spécifique, à savoir le fait que l'électricité ne puisse pas être stockée en grande quantité. Selon EDF, 50% des véhicules stationnent en permanence au domicile et 69 % restent garés 6 heures par jour en moyenne sur un emplacement réservé. Dans le cas des VE branchés, le réseau pourrait puiser l'électricité contenue dans les batteries de ceux-ci afin répondre aux fortes demandes ou pour pallier un manque ponctuel de production (Commission de Régulation de l'Énergie [CRE], s.d.). L'énergie chargée pendant les creux de consommation d'électricité, dans les meilleures conditions écologiques et

⁷⁰ Les VE et les réseaux électriques peuvent fournir des services l'un envers l'autre de manière réciproque : soit les véhicules électrifiés prélèvent de l'énergie au système (recharge), soit ils lui en fournissent (décharge).

économiques, pourrait de ce fait être injectée dans le réseau en période de pointe. Les avantages principaux de ce système sont dès lors de permettre la régulation de la fréquence du système et le lissage des pics de consommation (Wang & Wang, 2013, pp. 1822-1829).

Le système V2H quant à lui diffère du V2G par le fait que le véhicule est utilisé non plus afin d'injecter l'énergie contenue dans la batterie à travers le réseau électrique mais pour alimenter le foyer du propriétaire du VE. En rechargeant le véhicule lors des périodes creuses, puis en utilisant cette électricité comme source d'énergie pour alimenter la consommation d'un ménage, ce système permet de réduire la consommation d'énergie en période de pointe, lorsque la demande est plus élevée. Il peut également être mis à profit comme source d'alimentation de secours. Avec des capacités actuelles de l'ordre de 22 kWh, nul doute que les batteries des VE puissent facilement couvrir les besoins journaliers d'un foyer (Spath, 2015).

5.5. Hypothèses

Afin de fournir un modèle consistant, il a fallu poser une série d'hypothèses qui ont été, pour la plupart, décrites dans les sections précédentes. En voici une liste récapitulative contenant quelques hypothèses supplémentaires :

- L'horizon de cette étude est limité à l'année 2030.
- Seule la recharge des VE à domicile est considérée.
- Les prévisions quant au nombre de VE belges sur les routes en 2030 sont fournies par l'étude Sselectra (Chèze et al., 2015, pp. 17-46). Ces prévisions sont détaillées dans la section « Le marché de demain ».
- La consommation moyenne retenue pour tout modèle de VE est de 22kWh/100km et supposée constante jusqu'à l'horizon 2030.
- Les habitudes de roulage (distances moyennes parcourues, vitesse moyenne de déplacement, etc.) sont supposées être les mêmes pour les VE que pour les véhicules thermiques classiques. De plus, ces habitudes sont supposées constantes à l'horizon 2030.

- Le critère de répartition de la flotte de VE retenu dans le cadre de la modélisation est celui du type d'automobiliste (« travailleurs » ou « divers »). Seulement ces deux catégories d'automobilistes sont considérées.
- Les automobilistes de la catégorie « travailleurs » détiennent 85% de la flotte de VE. Ce taux est supposé fixe d'ici 2030. Parmi ces automobilistes, il est supposé que 36% d'entre eux ne possèdent pas d'emplacement privé afin d'effectuer la recharge du VE. Ces 36% d'automobilistes rechargent dès lors leur VE au moyen des bornes de recharge disponibles sur leur lieu de travail ou sur les bornes de recharge publiques (parkings publics, etc.). Pour 64% des automobilistes de la catégorie des travailleurs, il est donc supposé qu'ils possèdent un emplacement privé pour recharger le VE.
- Les automobilistes de la catégorie « divers » détiennent 15% de la flotte de VE. Ce taux est supposé fixe d'ici 2030. Il est supposé que la totalité de ces automobilistes possèdent un emplacement privé afin d'effectuer la recharge du VE.
- En période de jours ouvrables, les travailleurs effectuent quotidiennement qu'un seul trajet à savoir : aller-retour / domicile-lieu de travail.
- La distance moyenne séparant le lieu de travail du domicile, retenue dans cet ouvrage, est de 22km. Elle est supposée fixe jusqu'à l'horizon 2030.
- Les automobilistes de type « divers » parcourent en moyenne 40,6 km par jour, hors week-ends et jours fériés.
- Les deux catégories d'automobilistes parcourent la même distance moyenne, à savoir 43km par jour, pendant les week-ends et jours fériés.
- La vitesse moyenne de déplacement pour toutes catégories d'automobiliste est de 46km/h.
- Le temps moyen mis pour parcourir la distance séparant le lieu de travail au domicile étant dès lors d'approximativement 29 minutes, 1 minute supplémentaire sera nécessaire afin de sortir du véhicule et de le brancher à la borne de recharge.
- La recharge de 64% des VE appartenant à la catégorie des travailleurs se fera, en période de jours ouvrables, quotidiennement entre 15h et 19h à domicile suivant la répartition proposée à la figure 14. Les travailleurs prestant des heures de travail en horaires décalés ou travaillant à mi-temps ne sont dès lors pas pris en

considération (ou bien on peut supposer qu'ils fassent partie de la deuxième catégorie d'automobilistes).

- Les heures de rechargement des VE pendant les jours fériés et week-ends sont considérées comme totalement aléatoires, pour les deux catégories d'automobilistes. Il est dès lors convenu que seules les consommations, qui dépendent de la distance moyenne parcourue durant ces jours non ouvrables (43km), seront prises en considération.
- Les heures de rechargement pour les automobilistes de type « divers » en période de jours ouvrables sont également considérées comme 100% aléatoires.
- Seul le profil de charge naturelle est considéré dans la modélisation (la recharge en fonction du signal tarifaire n'est dès lors pas prise en compte).
- Il est supposé qu'un seul point de recharge par foyer est constamment disponible afin de recharger un seul véhicule. Les ménages sont donc supposés disposer de maximum un VE.
- Les puissances de recharge sont considérées comme constantes lors de toute la durée de rechargement du véhicule.⁷¹De plus, aucune perte ne sera considérée lors des rechargements. L'efficacité de la recharge est donc supposée à 100%.
- Seules les puissances de recharge de 2,3kW, 3,7kW et 7,4kW sont considérées pour les rechargements à domicile.
- La répartition des puissances de recharge pour les recharges à domicile est la même pour les deux catégories d'automobilistes : 50% à 2,3kW, 25% à 3,7kW et 25% à 7,4kW.
- Il est supposé qu'aucun recours du type V2G, V2H ou tout autre système faisant appel à la technologie de réseau intelligent n'est envisagé dans le cadre de la modélisation. Il n'est donc pas envisagé une quelconque possibilité de pilotage de la charge.
- La répartition de la consommation sur le réseau de distribution est la même peu importe l'endroit où le rechargement du VE s'effectue.
- Dans le cadre de la modélisation, le profil de charge de la flotte de VE est égal à la somme des profils de charge de chacun des VE qui constituent cette flotte.

⁷¹ Bien que la puissance de charge n'est en réalité pas constante sur toute la durée de la recharge.

- La production locale d'électricité (panneaux solaires par exemple), ou tout autre moyen permettant de ne pas avoir recours au réseau de distribution lors du rechargement du VE, n'est pas prise en compte dans la simulation.

Cette liste d'hypothèses est primordiale afin de fournir une limitation du cadre de la présente étude. Cependant, elle n'a en aucun cas la prétention d'être exhaustive.

6. Principaux résultats et analyses

Les paramètres et hypothèses décrits dans les sections antérieures ont été utilisés afin de fournir un modèle dont le but est l'évaluation de certains impacts que pourrait engendrer la recharge, en milieu résidentiel, d'un nombre conséquent de véhicules électrifiés à l'horizon 2030.

Dans un premier temps, la modélisation tentera de fournir une estimation de la consommation électrique annuelle relative aux déplacements de l'ensemble des VE susceptibles de composer le parc automobile électrique futur. La modélisation aura pour objectif de délimiter les valeurs limites possibles de consommation future (minimale et maximale). Il convient de bien insister sur le fait que ces deux consommations estimées se portent sur la flotte tout entière de VE, c'est-à-dire à l'échelle nationale.

Par après, la modélisation se portera sur les valeurs limites de la charge du réseau de transport (simulation avec un nombre minimum et maximum de VE) provoquée uniquement par le rechargement en milieu résidentiel des VE en période de jours ouvrables. Ceci constituera en une vue d'ensemble de la situation, c'est-à-dire de ce que la recharge d'autant de VE peut engendrer au niveau du réseau à haute tension, géré par le GRT Elia.

L'objectif poursuivi en générant des valeurs limites plutôt que des estimations précises repose sur le fait que de nombreuses incertitudes, notamment sur le nombre de VE qui constitueront la flotte de VE en 2030, planent encore à l'ordre du jour. En procédant de la sorte, il est présumé que les valeurs futures réelles concernant chacun des deux points abordés se situent entre ces intervalles, avec une certaine probabilité. Les deux modélisations ont dès lors comme but premier de fournir chacune un intervalle de valeurs : l'un susceptible de contenir la valeur de la consommation annuelle engendrée par les déplacements des VE, l'autre la charge du réseau générée exclusivement par le rechargement de ces VE en milieu résidentiel et à l'échelle du pays tout entier.

Dans la section qui suit, la modélisation tentera de fournir, toujours à l'aide des principales hypothèses et principaux paramètres décrits ultérieurement, une approximation de ce que peut être l'impact du rechargement d'un certain nombre de

véhicules électrifiés sur le réseau de distribution⁷². L'analyse se portera donc sur deux niveaux de tension : la première sur le réseau moyenne tension, et plus précisément la charge subie par un transformateur HT/MT, la deuxième sur le réseau basse tension, et plus précisément la charge subie par un transformateur MT/BT.

Enfin, la dernière section de ce chapitre tentera de donner une approximation du coût de remplacement des transformateurs 400 kVA dont dispose le GRD ORES, avec certain un taux de pénétration du VE en milieu urbain.

6.1. Modélisation énergétique

Deux scénarios ont été simulés pour ce qui concerne la flotte de VE à l'horizon 2030 en Belgique : l'un minimisant le déploiement du VE et prévoyant une flotte de 194.000 VE (Scénario 1), l'autre plus favorable au déploiement du VE et prévoyant 490.000 VE (Scénario 2).

- Scénario 1 : En ayant recours aux divers paramètres définis dans le chapitre 5, appliqués à une flotte de 194.000 VE, il ressort que plus de 3 milliards de kilomètres seraient parcourus par l'ensemble des VE. Avec une consommation moyenne de 0,22 kWh/km, la consommation électrique propre à ce parc de véhicules électrifiés est de 0,68 TWh pour l'année 2030.
- Scénario 2 : L'application des mêmes paramètres que ceux retenus dans le scénario 1, pour un parc composé de 490.000 VE, révèle que plus de 7,7 milliards de kilomètres seraient parcourus par la totalité des véhicules électrifiés. Ceci équivaut à une consommation électrique de 1,71 TWh.

À titre de comparaison, la consommation électrique propre à l'année 2014 en Belgique fut de 82,06 TWh, tous secteurs confondus. De ces 82,06 TWh, 18,94 TWh sont attribuables au secteur résidentiel et 1,59 TWh au secteur du transport (FEBEG, s.d.). La

⁷² Ce qui signifie que cette analyse ne se porte plus à l'échelle nationale, comme c'est le cas pour les deux premières sections, mais bien à un niveau plus local, pour lequel le réseau électrique est géré par les GRD belges (dont ORES).

consommation électrique propre aux VE obtenue dans le scénario 1 représenterait donc 0,83% de la consommation électrique totale de l'année 2014, 3,6% de la part relative au secteur résidentiel et 42,8% de celle du secteur des transports. Pour le scénario 2, cela représenterait respectivement 2,1%, 9% et 107,5%.

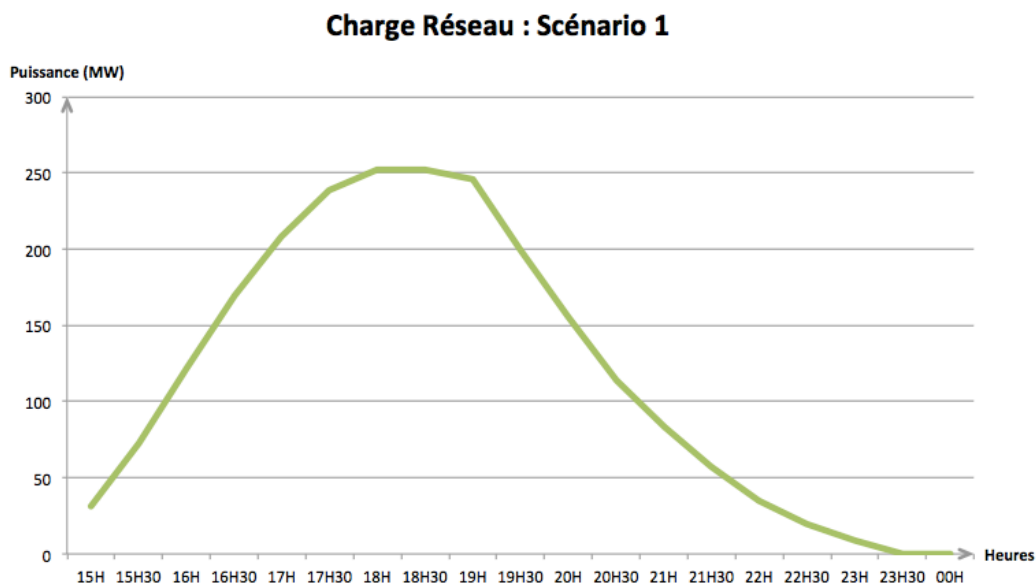
6.2. Modélisation globale de la charge du réseau de transport

Une fois n'est pas coutume, deux scénarios ont été modélisés en vue d'obtenir deux profils de charge du réseau de transport, l'un qui lui est plus favorable (Scénario 1), l'autre défavorable (Scénario 2)⁷³.

- Scénario 1 : Dans ce scénario-ci, la flotte de VE en 2030 est estimée à 194.000 VE. De cette flotte, seuls les VE appartenant à la catégorie des travailleurs, et supposés rechargés à domicile entre 15H et 19H, sont pris en considération. Le restant du parc est considéré comme soumis à un rechargement sur un emplacement autre qu'en milieu résidentiel.

Le nombre de VE rechargés entre 15H et 19H s'élève donc à 105.536 VE (64% des 85% de véhicules appartenant à la catégorie 1). La distance moyenne parcourue par cette catégorie d'automobiliste étant de 44 km/jour, il conviendra de restituer approximativement 1,022 GWh à l'ensemble de la flotte lors de la recharge. D'après les répartitions des puissances et temps de rechargement définies dans le chapitre 5, le profil de charge du réseau, avec ou sans VE, apparaît comme suit :

⁷³ Pour rappel, la modélisation porte uniquement sur les recharges à domicile, effectuées entre 15H et 19H, en période de jours ouvrables. Dans cette section 6.2, la modélisation se concentre sur la charge du réseau belge en général, et pour l'entièreté du parc de VE estimé à l'horizon 2030.



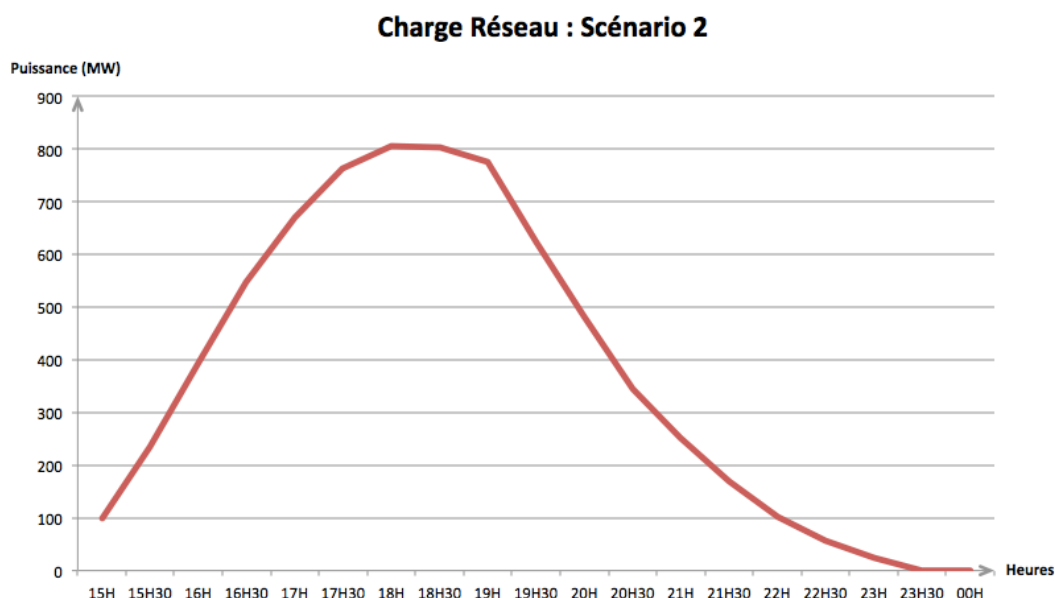
On observe qu'une pointe de charge à 251,7 MW ainsi qu'une à 251,9 MW surviennent à 18H et 18H30, respectivement. À titre d'information, la capacité de production installée en Belgique (en 2015) est de 21.523 MW (FEBEG, s.d.). Une pointe de charge d'une telle ampleur survenant par exemple le 11 janvier 2015 à 18H30 (Elia, s.d.) ferait passer la charge du réseau de transport de 11.623 MW à 11.875 MW, soit une augmentation de 2,2%.

- Scénario 2 : Ici, la flotte de VE est estimée à 490.000 VE. Ce scénario est légèrement plus complexe dans le sens où les deux catégories d'automobilistes sont considérées. La première est la même que celle décrite dans le scénario 1. La seule différence étant que cette fois-ci, les travailleurs détiennent 416.500 VE dont 266.560 VE⁷⁴ sont supposés être rechargés à domicile entre 15H et 19H. La catégorie d'automobilistes de type « divers » détient quant à elle 73.500 VE⁷⁵, tous considérés comme rechargés à domicile durant la même plage horaire. La distance moyenne parcourue par la première catégorie d'automobilistes est toujours de 44 km/jour. La distance moyenne acheminée par la deuxième catégorie est un peu moindre, elle s'élève à 40,6 km/jour. Toujours avec une consommation moyenne estimée à 0,22 kWh/km,

⁷⁴ Ce nombre est obtenu en considérant 64% des 416.500 VE.

⁷⁵ Ce nombre est obtenu en considérant 15% de la flotte totale qui s'élève à 490.000 VE.

le rechargement à domicile de ces 340.060 VE⁷⁶ nécessitera approximativement 3,24 GWh. En considérant une nouvelle fois les répartitions des puissances et temps de rechargement décrites dans le chapitre 5, le deuxième scénario procure le profil de charge du réseau suivant :



Ce graphe révèle des pointes de charge de l'ordre de 804,16 MW et 803,39 MW à 18H et 18H30, respectivement. En prenant à nouveau l'exemple de la charge du réseau pour le 11 janvier 2015 à 18H30 (Elia, s.d.), le rechargement des VE ferait passer la charge totale du réseau de 11.623 MW à 12.426 MW, soit une augmentation de 6,9%.

Ces deux scénarios ont démontré les cas extrêmes de pointes de charge pouvant survenir suite à la recharge d'un grand nombre de VE dans le milieu résidentiel, en les concentrant sur une certaine période de la journée. D'un point de vue macro, l'infrastructure du réseau de transport belge semble à même de supporter ces pointes de charge susceptibles d'être observées. En effet, la charge de pointe relevée en 2015 s'élevait à 12.634 MW (CREG, 2015, p. 46)⁷⁷. En ajoutant à cette pointe la valeur la plus élevée obtenue dans le scénario 2, elle passerait de 12.634 MW à 13.438 MW (augmentation de 6,4%). Cette dernière valeur est pratiquement similaire à la puissance

⁷⁶ Ce nombre est obtenu par l'addition du parc de VE rechargés à domicile et appartenant aux deux catégories d'automobilistes.

⁷⁷ Voir Annexe 7 : «Charge du réseau ELIA pour la période 2007-2015».

de pointe maximale observée en 2013 (13.446 MW)⁷⁸ (CREG, 2015, p.46). Dès lors, il semble plus judicieux de se tourner vers le réseau à plus petite échelle, vers les réseaux de distribution, qui seraient éventuellement plus susceptibles d'être menacés par le rechargement d'un certain nombre de VE. C'est ce que la section 6.3 tentera d'analyser.

6.3. Modélisation de la charge du réseau de distribution

Poussons l'analyse un peu plus loin en l'appliquant au réseau à plus faible tension, et plus particulièrement à la charge subie par les transformateurs HT/MT en premier lieu, celle subie par les transformateurs MT/BT en deuxième lieu⁷⁹. Le postulat de départ est le suivant : si lors des pics de consommation hors véhicules électrifiés, on concentre la recharge de ces derniers, alors la valeur de la courbe de charge hors VE ajoutée à celle relative aux rechargements des VE peut devenir grande et excéder la puissance nominale du type de transformateur considéré.

Avant d'entamer cette analyse, certaines précisions pour les moins importantes doivent d'être apportées. Les mesures quart horaires⁸⁰ de charge relatives aux postes de transformation, c'est-à-dire les postes effectuant la liaison HT/MT entre le GRT Elia et les GRD belges, sont facilement disponibles⁸¹ car nécessaires au fonctionnement du marché (c'est par exemple à ce niveau que des processus de marché tels que l'infeed (Elia, s.d.) ou l'allocation sont calculés). L'obtention des mesures quart horaires de charge pour les cabines de transformation, c'est-à-dire MT/BT, fut par ailleurs plus compliquée car celles-ci ne sont pas disponibles. La raison principale étant que le GRD ne les mesure pas, sauf en cas d'études ou de problèmes particuliers⁸². Seules des

⁷⁸ Ceci confirmerait éventuellement les propos tenus par les experts ELIA interviewés dans le cadre de ce présent ouvrage.

⁷⁹ L'analyse porte sur la combinaison d'éléments temporellement distincts : la modélisation de la recharge d'une flotte de VE à l'horizon 2030 combinée à la charge supportée par certains types de transformateurs dont les données de charge sont propres à l'année 2016.

⁸⁰ Dans le domaine de l'électricité comme dans de nombreux autres domaines, les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes. On parle de quart horaires. Ceci ne pose toutefois pas de problèmes face au choix d'avoir opté pour des relevés de puissances de charge effectués toutes les 30 minutes (dans le cadre de la modélisation).

⁸¹ Bien qu'elles soient facilement disponibles, l'analyse se portera uniquement sur un seul transformateur HT/MT, celui propre à la ville de Mons. Ce transformateur semblait représentatif de l'ensemble des transformateurs HT/MT.

⁸² Par exemple lors d'un problème de tension ou encore pour des transformateurs vétustes, ce qui est inexploitable dans le cadre de ce travail.

mesures⁸³ pour un transformateur 400 kVA de zone urbaine ont pu être obtenues car celui-ci faisait, à l'heure d'écrire ces lignes, l'objet d'une étude spécifique des pertes (administratives). Aucune donnée comparable n'était malheureusement disponible pour un transformateur de 160 kVA. Pour cette raison, il a été décidé, en collaboration avec des membres d'ORES (principal GRD en Wallonie), de simuler la courbe de charge de deux transformateurs représentatifs. Cette simulation a été appliquée à un transformateur de 160 kVA ainsi qu'à un transformateur de 400 kVA⁸⁴. Le choix de ces deux types de transformateurs n'est pas anodin. Sur les 20.000 transformateurs MT/BT (approximativement) dont dispose ORES en Wallonie, près de 75% de ceux-ci ont une puissance nominale comprise entre 160 kVA et 400 kVA. Les transformateurs de puissance supérieure sont peu fréquents : moins de 500 ont une puissance nominale de 630 kVA et seulement quelques-uns présentent une puissance nominale de 800 kVA ou 1000 kVA. De plus, ces types de transformateurs se retrouvent principalement dans des zones mixtes avec présence d'industries, ne correspondant donc pas au propos de la présente étude.

Afin de justifier davantage le choix des deux types de transformateurs retenus dans le cadre de cette simulation, voici quelques informations supplémentaires :

- Transformateur 160 kVA : La puissance nominale de 160 kVA concerne la puissance limite pour des postes de transformation aériens (PTA) utilisés dans les zones rurales. Nous considérerons donc que ce type de transformateurs est représentatif d'une zone non urbanisée. D'après les données (partiellement confidentielles) d'ORES, il ressort qu'en moyenne 88 clients sont raccordés sur un tel transformateur. De plus, près de 30% des transformateurs d'ORES ont une puissance de 160 kVA.
- Transformateur 400 kVA : C'est la puissance courante maximale généralement utilisée pour les zones urbaines ne présentant pas d'industrie ou de consommateurs particuliers. En moyenne, 186 clients sont raccordés sur un tel

⁸³ Mesures exploitables dans le cadre de ce travail.

⁸⁴ La simulation pour le deuxième transformateur de 400 kVA est volontaire. L'étude faite par rapport au premier a été menée par souci de comparaison des résultats obtenus par la simulation.

transformateur et près de 15% des transformateurs d'ORES ont une puissance de 400 kVA.

Les simulations des courbes de charge des transformateurs ont été basées sur le recours aux SLP's (Synthetic Load Profiles)⁸⁵. Ces SLP's indiquent, pour chaque unité de temps, la fraction de la consommation annuelle consommée en moyenne sur un raccordement. Ils sont fournis sous forme de données chiffrées (Brugel, s.d.). Il existe 7 profils SLP dont 4 pour l'électricité et 3 pour le gaz.

Les profils SLP⁸⁶ propres à la consommation d'électricité sont les suivants (Synergrid, 2016) :

- SLP11⁸⁷ : Profil non résidentiel avec puissance de branchement inférieure à 56 kVA. Clients professionnels ayant du bihoraire ou de l'exclusif nuit ;
- SLP12 : Profil non résidentiel avec puissance de branchement supérieure ou égale à 56 kVA. Clients professionnels MMR (Monthly Meter Reading) ;
- SLP21 : Profil résidentiel pour des clients simple tarif YMR (Yearly Meter Reading) ;
- SLP22 : Profil résidentiel pour des clients ayant du bihoraire ou de l'exclusif nuit YMR (Yearly Meter Reading).

Dans le cadre de la simulation, les consommations moyennes retenues pour ces différents types d'SLP's sont les suivantes⁸⁸ :

- SLP11 : 6755 kWh ;
- SLP12 : 56.528 kWh ;

⁸⁵ ORES utilise d'ailleurs la même méthode pour élaborer ses politiques techniques. La différence étant que leur méthode est basée sur des valeurs de consommation réelles, et non moyennes, pour les clients connectés aux transformateurs.

⁸⁶ Voir Annexe 8.1. « Exemple SLP21 et SLP22 » pour une illustration de deux types de SLP's du début d'année 2016.

⁸⁷ Il s'agit ici de « petits » clients professionnels qu'ORES peut difficilement distinguer des clients résidentiels.

⁸⁸ Ces estimations moyennes de consommation datent de l'année 2014. Elles ont été extraites d'une base de données que possède ORES. Voir Annexe 8.2. « Consommations électriques moyennes par type de SLP considéré » pour le tableau reprenant les chiffres de l'extraction de la base de données ainsi que la façon dont ils ont été agglomérés pour en tirer des moyennes.

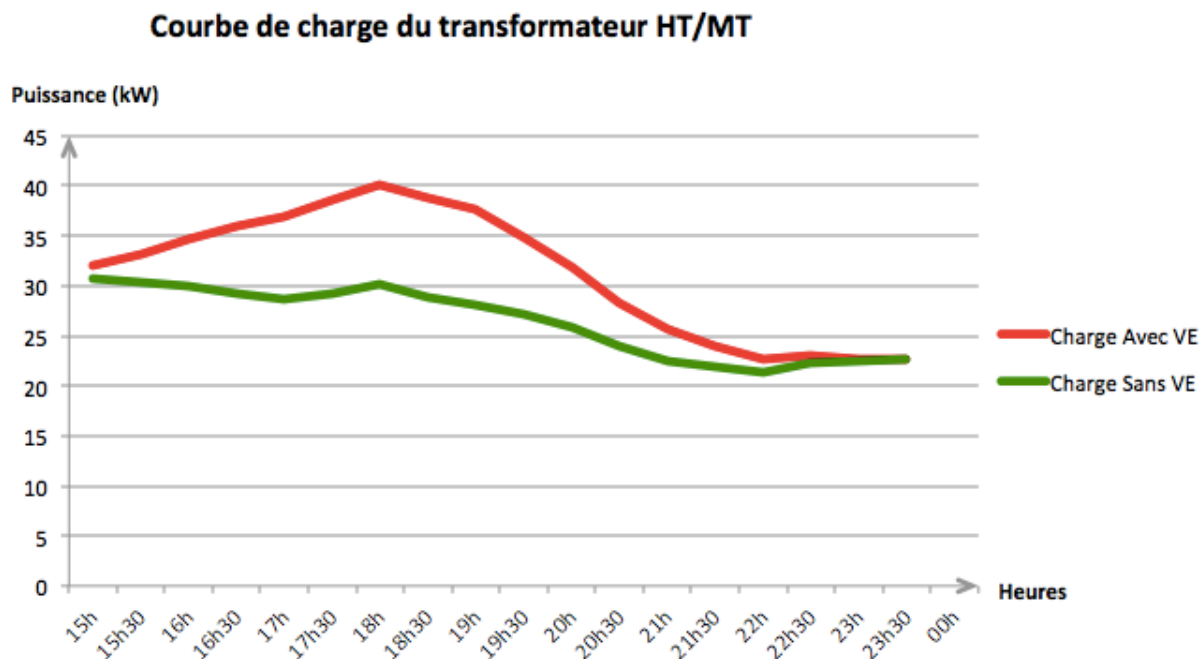
- SLP21 : 3031 kWh ;
- SLP22 : 6221 kWh.

Après cette mise au point face aux différentes difficultés rencontrées en vue d'obtenir les mesures de charge propres aux différents types de transformateurs considérés, passons dans le vif du sujet en soumettant les résultats de la modélisation du rechargement d'un certain nombre de VE au transformateur HT/MT.

- Transformateur HT/MT : le transformateur HT/MT retenu dans ce cas-ci est celui propre à la ville de Mons. 12.587 clients sont raccordés à ce transformateur et sa puissance nominale est de 40 MVA. Il s'agit ici d'un exemple de poste urbain qui n'est peut-être pas généralisable à d'autres villes. Le point de charge annuelle subie par ce transformateur date du 22 janvier 2015 à 15h (pour la tranche horaire retenue dans la modélisation, c'est-à-dire 15h00-00h00) et équivaut à 30.788,89 kW, soit approximativement 30,79 MW. En appliquant les différents paramètres décrits dans le chapitre 5⁸⁹, la modélisation révèle qu'avec un nombre avoisinant les 4.165 VE, une pointe de charge à 40 MW apparaît à 18h⁹⁰. Cela signifie que si 33% des clients propres à ce transformateur possèdent un VE, la puissance nominale du transformateur HT/MT est atteinte à 18h, pour un jour présentant le même profil de charge que celui du 22 janvier 2015. Si nous prenons un cas plus extrême avec 6.290 VE, soit 50% des clients raccordés au transformateur HT/MT, il ressort que la pointe de charge est à nouveau atteinte à 19h et prend cette fois-ci la valeur de 45,04 MW, soit 12,6% de la puissance nominale du transformateur. Quant à la courbe de charge propre au transformateur considéré, avec ou sans la flotte de 4.165 VE, elle est la suivante :

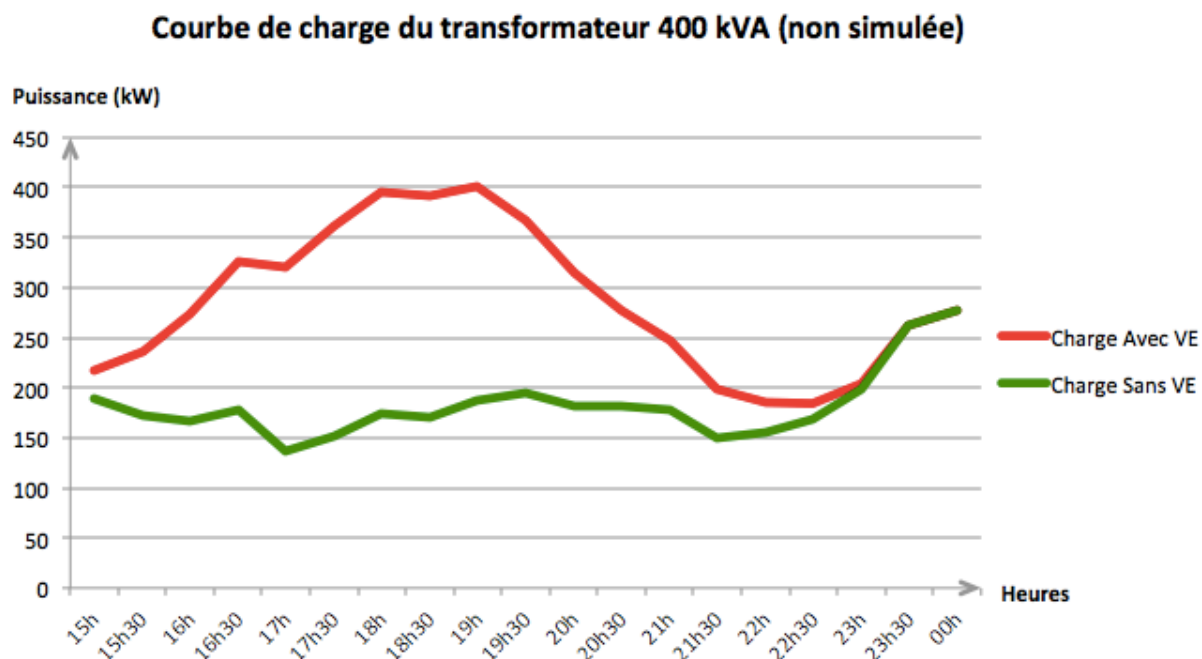
⁸⁹ L'unique différence étant que l'on considère ici que la totalité des VE sont rechargés à domicile, c'est-à-dire que tous les utilisateurs résidentiels qui possèdent un VE disposent d'un emplacement pour recharger le VE à domicile (et plus les 64% d'automobilistes de la catégorie 1 et les 100% de la catégorie 2). Cette remarque est valable pour chacun des cas considérés dans cette section.

⁹⁰ Voir Annexe 9 : «Illustration du modèle» pour voir un aperçu de la modélisation utilisée, dans le cas de la recharge de 4.165 VE (et la pointe de charge qui en résulte, en ne considérant pas la charge du réseau hors VE).



- Transformateur 400 kVA ne faisant pas l'objet de la simulation : comme dit précédemment, l'analyse se portera sur deux transformateurs de puissance nominale égale à 400 kVA. Considérons tout d'abord le transformateur pour lequel les données de charge ont pu nous être procurées car faisant l'objet d'une étude actuellement en cours. Celui-ci est propre à une cabine urbaine⁹¹ pour laquelle environ 175 clients sont raccordés. La pointe de charge subie par ce transformateur depuis le début de l'année 2016 (pour la tranche horaire considérée) date du 20 janvier 2016 et s'élevait à approximativement 277 kW. Il a dès lors été convenu que cette date soit celle de référence pour ce transformateur. En appliquant à nouveau les mêmes paramètres que ceux appliqués au transformateur HT/MT et décrits dans le chapitre 5, on aperçoit qu'une pointe de charge à 400 kW survient à 19h et avec une flotte de 93 VE. Cela signifie que dans le cas où environ 53% des clients propres à ce transformateur possèdent un VE, la puissance nominale de la cabine (400 kVA) pourrait être atteinte. Voici le graphe propre à sa courbe de charge, en considérant à nouveau la charge avec ou sans les 93 véhicules électrifiés :

⁹¹ Dont la localisation ne sera pas précisée pour des raisons de confidentialité.



➤ Transformateur 400 kVA faisant l'objet d'une simulation : L'application des différentes valeurs quart horaires de chacun des types de SLP's aux consommations qui leurs sont propres (et qui ont été détaillées dans l'introduction de cette section 6.3.), permet d'obtenir des mesures de charge pour un transformateur moyen de 400 kVA. Par souci de comparaison objective, on considérera également que ce transformateur est propre à 175 clients. Cependant une répartition de ces clients suivant le type de SLP qui leur est propre a été effectuée suivant la même clé de répartition que celle de la moyenne de tous les transformateurs 400 kVA dont ORES dispose en Wallonie. La répartition des 175 clients est donc la suivante :

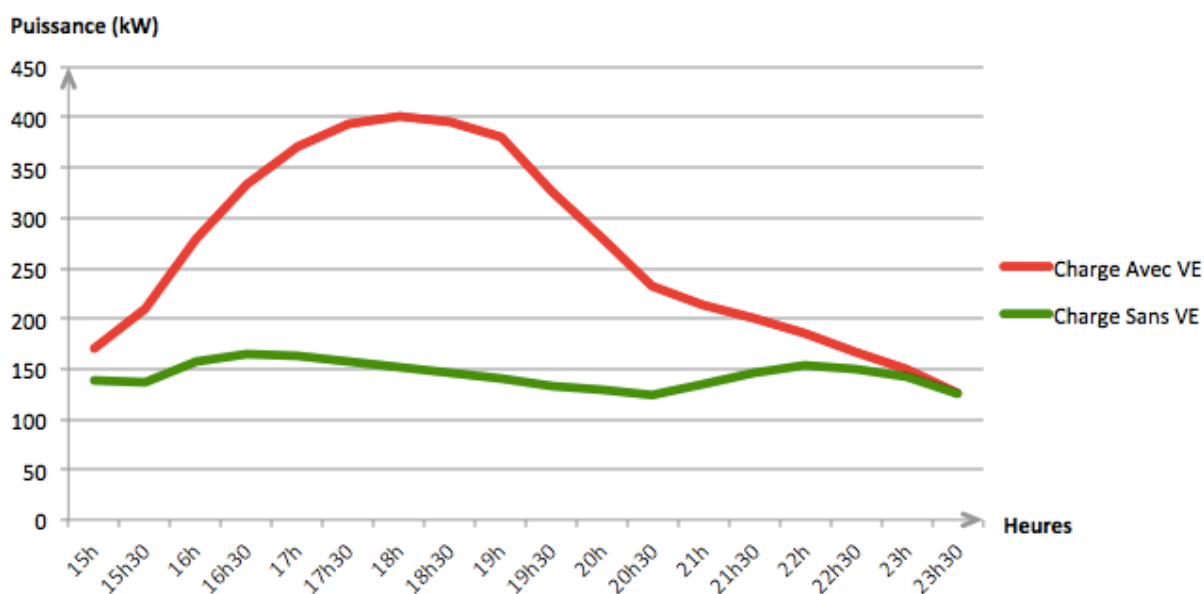
- 28 clients de type SLP11 ;
- 3 clients de type SLP12 ;
- 109 clients de type SLP21 ;
- 35 clients de type SLP22.

En appliquant à chacun de ces clients la consommation moyenne qui lui est propre pour chaque valeur quart horaire SLP de l'année 2016, il ressort que la date du 5 janvier 2016 à 16h45 est celle la plus critique en ce qui concerne la charge pouvant être subie par les transformateurs 400 kVA et pour lesquels environ 175 clients sont raccordés. Cette charge prend la valeur d'approximativement 165 kW. La différence de

pointe par rapport à celle observée dans le cas précédent s'explique pour diverses raisons, notamment par le fait que les consommations considérées dans ce cas-ci sont des consommations moyennes. De plus, ce sont les valeurs quart horaires des SLP's de l'année 2016 qui ont été appliquées (et non des mesures réelles) afin de ventiler cette consommation pour chaque quart horaire 2016. Ajoutons à cela le fait que, pour le cas précédent, il a été supposé qu'environ 175 clients étaient raccordés au transformateur 400 kVA. Il est de ce fait probable que davantage de clients y étaient raccordés à la date du 20 janvier.

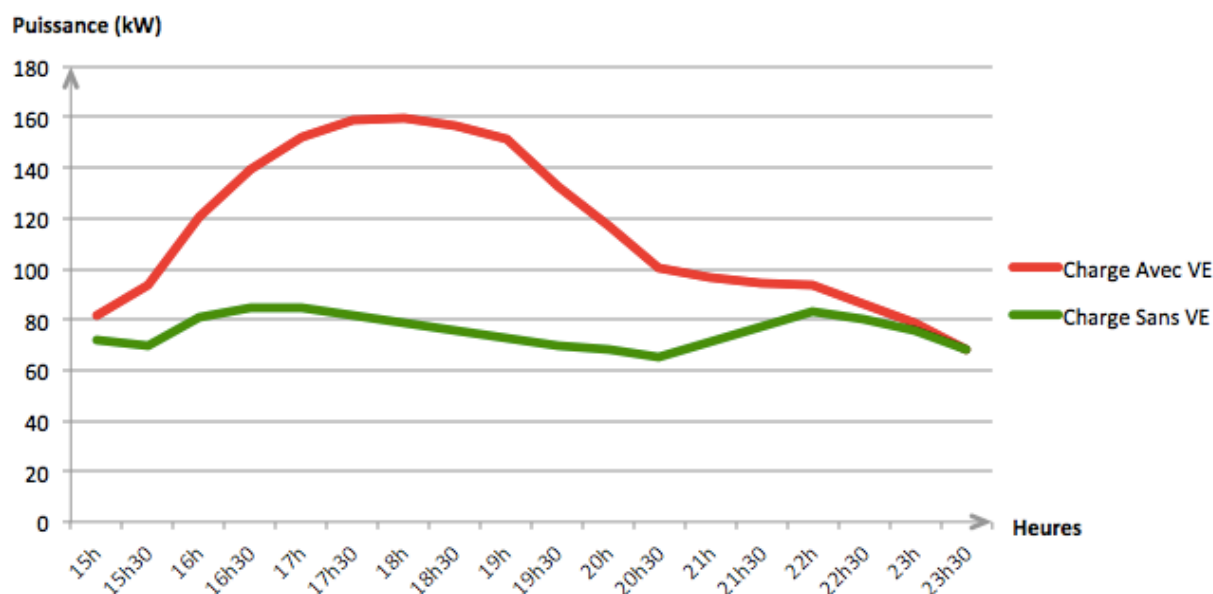
L'analyse se portera dès lors sur la charge moyenne subie par le transformateur 400 kVA et obtenue par la simulation pour la journée du 5 janvier 2016. Etant donnée la pointe de charge nettement moindre en comparaison à celle du 20 janvier pour le transformateur 400 kVA précédent, il paraît clair qu'un nombre plus important de VE sera nécessaire afin d'atteindre la pointe de charge équivalente à la puissance nominale du transformateur. L'application des mêmes paramètres que ceux utilisés dans le cas précédent révèle en effet qu'il faudra une flotte de 105 VE (soit 60% des clients de la zone urbaine desservie par le transformateur) pour atteindre les 400 kVA de capacité de charge du transformateur en question (à 18h). La courbe de charge propre au transformateur 400 kVA considéré dans cet exemple est la suivante :

Courbe de charge du transformateur 400 kVA (simulée)



Notons toutefois qu'en cas d'une flotte comparable à celle retenue dans le cas précédent, c'est-à-dire 93 VE (53% des clients), la pointe de charge prendra la valeur de 373 kW (toujours à 18h).

- Transformateurs 160 kVA (PTA) faisant l'objet d'une simulation : Le dernier type de transformateur étudié dans cet ouvrage concerne celui dont la puissance nominale est de 160 kVA. Rappelons que cette puissance est la valeur limite pour les PTA utilisés dans les zones rurales. C'est pourquoi il est justifié de considérer ces PTA comme représentatifs d'une zone non urbanisée. La même démarche que celle suivie dans le cas précédent a été retenue pour ce cas-ci. Les transformateurs 160 kVA détenus par ORES sont, en moyenne, raccordés à 88 clients dont 10 de type SLP11, 2 de type SLP12, 56 de type SLP21 et enfin 20 de type SLP22. Ce nombre moyen de clients ainsi que leur répartition suivant les types de SLP seront ceux choisis dans cette analyse. La raison de ce choix est simple : fournir une analyse de la charge subie par un PTA 160 kVA de référence. En appliquant les mêmes moyennes de consommation que celles utilisées précédemment, pour chacun des types de SLP, on constate que la date la plus critique de l'année 2016 pour les transformateurs 160 kVA est la même que celle obtenue dans l'exemple précédent, à savoir le 5 janvier 2016 à 16H45. La charge générée par la consommation électrique des 88 clients respectifs équivaut à une puissance de 85,3 kW, soit environ 53% de la puissance nominale du PTA en question. Afin d'atteindre le seuil critique du transformateur considéré, il s'avère qu'approximativement 34 VE sont nécessaires. Ce nombre représente le fait que si pas moins de 39% des clients, raccordés en milieu rural au PTA 160 kVA étudié, possèdent un VE, d'éventuels soucis sont susceptibles d'apparaître. La courbe de charge propre à ce dernier transformateur est la suivante :

Courbe de charge du transformateur 160 kVA (simulée)

Les analyses proposées dans cette étude, et relatives aux différents transformateurs étudiés, sont éloquentes. Elles permettent de procurer un aperçu global du seuil limite de charge acceptable par chacun des trois types de transformateurs considérés, et ce, pour un certain taux de pénétration du VE par zone retenue, urbaine ou rurale. Afin de fournir un tour d'horizon rapide des seuils critiques quant au nombre de VE limite acceptable par chacun des transformateurs étudiés, voici un tableau récapitulatif :

Type de Transfo	Nombre de Clients	Nombre critique de VE	% de VE p/r au nombre de clients
HT/MT 40MVA	12.587	4165	33%
400 kVA (non simulé)	175	93	53%
400 kVA (simulé)	175 ⁹² ou 186	105 ou 102	60% ou 55% ⁹³
160 kVA (simulé)	88	34	39%

⁹² Comme il a été précisé, le choix de 175 clients pour ce type de transformateur est volontaire. Il a pour but de comparer de manière objective les deux transformateurs 400 kVA considérés. Dans la réalité, le nombre moyen de clients pour ce transformateur est de 186 clients.

⁹³ En considérant le nombre moyen réel de clients pour un transformateur 400 kVA, c'est-à-dire 186 clients, la puissance nominale du transformateur est atteinte à 18h et avec 102 VE, soit 55% des clients.

D'après ces valeurs, on constate que ce sont les transformateurs HT/MT qui seraient les plus susceptibles d'être menacés par le déploiement de l'électromobilité. Viendraient ensuite les transformateurs propres aux zones rurales, dont le seuil critique se situe à 39% de VE pour l'ensemble des clients raccordés. Enfin, les transformateurs 400 kVA seraient, a priori, moins « inquiétés » par le développement des véhicules électrifiés. Notons toutefois que ces valeurs obtenues sont représentatives des types « moyens » de transformateurs. Dans la réalité, il est fort probable que certains transformateurs soient exposés à des valeurs critiques plus rapidement, c'est-à-dire avec un taux de VE plus faible, car présentant une courbe de charge hors VE plus élevée que la moyenne.

Enfin, à titre purement informationnel et afin d'avoir une idée du coût que pourrait engendrer le remplacement des transformateurs 400 kVA, la section 6.4 tentera de préciser certains éléments technico-financiers.

6.4. Estimation du coût de remplacement éventuel des transformateurs 400 kVA suite à un taux de pénétration du VE donné

La modélisation proposée dans cet ouvrage sera, une dernière fois, utilisée afin de donner un ordre de grandeur du coût de remplacement d'un certain nombre de transformateurs suite à un taux fixé de pénétration du VE en milieu urbain⁹⁴.

Commençons tout d'abord l'analyse par une description des éléments technico-financiers qu'il convient d'avoir en tête avant d'évaluer l'impact financier. La durée d'amortissement des transformateurs MT/BT est de 33,3 ans (soit un taux d'amortissement annuel de 3%). Cette période peut éventuellement aller jusqu'à 50 ans pour l'un ou l'autre élément du réseau, tels que certains câbles. Les durées d'amortissement sont, dans la plupart des cas, imposées par le régulateur compétent pour les tarifs (précédemment la CREG- qui a fixé les durées d'amortissement- et désormais la CWaPE pour ce qui concerne le GRD ORES).

⁹⁴ Uniquement pour les transformateurs dont dispose le GRD principal en Wallonie, ORES.

Le coût moyen⁹⁵ d'un transformateur est d'environ :

- 10.600€ pour un transformateur ≤ 160 kVA ;
- 11.400€ pour un transformateur > 160 kVA et ≤ 250 kVA ;
- 15.000 € pour un transformateur > 250 kVA et ≤ 400 kVA ;
- 20.700 € pour un transformateur > 400 kVA et ≤ 630 kVA ;
- 29.900 € pour un transformateur > 630 kVA.

Grâce à ces données, il est possible de se faire une idée du coût de remplacement si les VE (ou d'autres types de charge telles que les pompes à chaleur) devaient émerger subitement. En se concentrant uniquement sur le déploiement du véhicule électrifié, dont la recharge s'effectue de manière lente ou semi-lente en milieu résidentiel, la modélisation est mise à contribution afin d'évaluer ces coûts susceptibles d'être observés pour le remplacement des transformateurs 400 kVA. Le choix de se concentrer exclusivement sur ces transformateurs est simple. Les transformateurs 160 kVA sont, en moyenne et pour le cas d'ORES, suffisamment conçus que pour pouvoir faire face à un taux très élevé de pénétration du VE en milieu rural. Il ressort de la modélisation qu'un taux de 54% (soit près de 47 clients sur les 88 clients moyens raccordés aux transformateurs 160 kVA qui possèdent un VE) serait nécessaire afin d'envisager un remplacement de la totalité des transformateurs 160 kVA, soit près de 5.800 transformateurs et donc un coût d'approximativement 61.480.000€⁹⁶.

La donne est toute autre pour ce qui concerne les transformateurs 400 kVA, en milieu urbain donc. Pour ce cas-ci, la méthodologie s'est limitée à un taux de pénétration du VE de l'ordre de 27% (soit près de 51 clients sur les 186 clients moyens raccordés aux transformateurs 400 kVA qui possèdent un VE). Avec un tel taux, il ressort que 2,9% des transformateurs 400 kVA dont dispose ORES seraient susceptibles de voir leur puissance nominale régulièrement atteinte lors des pointes de charge liées au rechargement des VE. En supposant qu'il convienne de remplacer ces 2,9% de transformateurs 400 kVA, cela représenterait un coût d'approximativement 1.095.000€.

⁹⁵ Données datant de 2013.

⁹⁶ Coût qui sera bien entendu réparti dans le temps, les transformateurs présentant des durées d'amortissement restant différentes.

7. Conclusion

L'émergence croissante des véhicules électrifiés doit nous amener à considérer l'impact de leur recharge sur les infrastructures du réseau électrique.

Des investissements futurs pour renforcer les moyens existants tant en capacité de production qu'en réseau de transport et de distribution seront-ils nécessaires à court ou à moyen terme ?

L'objet de cet ouvrage était de fournir une approche quantitative et qualitative afin d'évaluer l'impact du rechargement d'une flotte de VE, en milieu résidentiel, en excluant les systèmes de recharges rapides encore marginaux.

Alors que de prime abord on aurait pu craindre un déséquilibre complet de la chaîne de production et d'approvisionnement, au travers de la modélisation proposée, divers éléments surprenants ont pu être mis en évidence.

Il ressort d'abord qu'avec les prévisions fournies par diverses études relatives au nombre de VE en circulation sur le territoire belge à l'horizon 2030, la consommation électrique annuelle propre à ce parc nouveau serait comprise entre 0,68 TWh et 1,71 TWh. Ce montant est in fine marginal en comparaison à la consommation électrique globale d'une année comme 2014 qui s'élevait à 82,06 TWh, tous secteurs confondus.

Notre étude révèle également que dans un horizon à court ou à moyen terme, considérant les estimations d'une flotte de maximum 494.000 VE en 2030 – estimation la plus optimiste à ce jour - , les réseaux de transport qui acheminent l'électricité en haute tension ne devraient pas craindre l'avènement du VE sur notre territoire. La pointe de charge relative à la combinaison de l'ensemble des consommations électriques belges cumulée au rechargement des VE ne devrait pas dépasser les pointes de charge déjà observées et subies dans les années passées par les infrastructures du réseau de transport électrique belge. Quand on sait que la puissance de production installée en Belgique est d'approximativement 21,5 GW, nul doute que le réseau à haute tension est suffisamment constitué pour pouvoir faire face à un nombre conséquent de recharges de VE effectuées en milieu résidentiel.

L'étude s'est ensuite focalisée sur les infrastructures du réseau de distribution, et plus précisément sur les transformateurs qui en font partie. En premier lieu, la modélisation a fourni une estimation de la puissance de charge additionnelle subie par un transformateur HT/MT typique d'une grande ville belge. Là, il s'avère qu'un taux de pénétration du VE de l'ordre de 33% suffirait à ce que la pointe de charge atteigne voire dépasse la valeur de la puissance nominale d'un transformateur typique (40 MVA). L'étude s'est ensuite portée sur deux transformateurs MT/BT, à savoir d'une puissance nominale de 160 kVA ainsi qu'un transformateur de 400 kVA. Le premier est typique d'un environnement rural, le second d'un environnement urbain. L'application de notre modèle démontre que des taux de pénétration importants sont nécessaires pour que la puissance nominale – et donc limite - de ces transformateurs ne soit atteinte (plus de 53% pour les transformateurs 400 kVA et pratiquement 40% pour les transformateurs 160 kVA). On peut donc supposer que c'est uniquement l'agrégation des recharges de VE de types lentes et semi-lentes, qui risquerait de poser problème, dans un premier temps, pour le réseau de transformateurs HT/MT.

Enfin, l'analyse a considéré les coûts éventuels susceptibles d'être supportés par le GRD principal en Wallonie, ORES. Avec un taux de pénétration du VE d'environ 54% en milieu rural, la totalité des transformateurs 160 kVA sont présumés atteindre leur puissance nominale lors des pointes de charge. C'est donc à long terme, lorsque le déploiement du véhicule électrifié sera bien plus conséquent que ce qu'il n'est actuellement, que la menace pour cette catégorie de transformateurs risque d'être considérable. Un remplacement de la totalité des transformateurs 160 kVA dont dispose ORES engendrerait un coût proche des 160 millions d'euros. La situation est différente en ce qui concerne les transformateurs 400 kVA pour lesquels un taux de pénétration du VE de 27% serait supporté par plus de 97% de ceux-ci. Avec un tel taux de pénétration, le remplacement de la part minimale des transformateurs susceptibles de voir leur puissance nominale dépassée représenterait un coût d'un peu plus d'1 million d'euros.

Ces montants restent somme toute bien marginaux eu égard aux investissements annuels habituels consentis par le GRD.

Les résultats obtenus dans cette analyse sont néanmoins limités du fait de deux

éléments principaux : le premier concerne le fait que le nombre de transformateurs 400 kVA détenus par ORES dont le pourcentage de puissance nominale maximal (hors VE) atteint est de 70% ou plus, est faible. Il est donc évident qu'un taux de pénétration conséquent doit être envisagé afin d'augmenter la charge subie par ces transformateurs 400 kVA pour qu'ils atteignent 100% de leur puissance nominale respective. Le deuxième élément tient plutôt de la modélisation utilisée dans cet ouvrage et s'applique à toutes les analyses qui ont été faites. La modélisation se concentre volontairement sur les recharges lentes et semi-lentes en milieu résidentiel. Ne considérant pas les recharges plus rapides⁹⁷, elle a tendance à minimiser l'impact du déploiement des VE sur les transformateurs. Elle a cependant permis de relever un élément essentiel face au déploiement des véhicules automobiles électrifiés. En privilégiant davantage les recharges lentes, le VE ne devrait, pour au moins quinze années, pas entraîner d'investissements conséquents dans le renforcement des infrastructures du réseau électrique (et principalement des transformateurs).

Quoi qu'il en soit, à plus long terme, une solution économique très prometteuse proviendrait des Smart Grids. Grâce à cette technologie, les véhicules électrifiés pourraient eux-mêmes présenter un intérêt pour la conduite du réseau électrique voire constituer une solution partielle au stockage de cette énergie. Des systèmes tels que le pilotage de charge permettraient en quelque sorte de « lisser » les pointes de charge qui surviendraient lors du rechargement d'un nombre concentré de véhicules électrifiés. Combinée aux périodes quotidiennes les plus propices à la production d'énergie de sources renouvelables, l'optimisation des périodes de rechargement des VE serait également bénéfique pour l'environnement.

Affaire à suivre...

⁹⁷ En cas de concentration des recharges rapides, par exemple sur des espaces publics comme des parkings ou autre parc de sociétés, un réseau spécifique est certainement nécessaire. Cette problématique est cependant hors cadre de la présente étude.

Bibliographie

Arebor-energie. (s.d.). Énergie massique d'une batterie. En ligne http://www.arebor-energie.fr/encyclopedie/index.php?title=%C3%89nergie_massique_d%27une_batterie (Consulté le 04/06/16).

Association des Véhicules Électriques du Québec [AVÉQ]. (2013). Durée de vie réelle des batteries lithium ion. En ligne <http://www.aveq.ca/actualiteacutes/duree-de-vie-reelle-des-batteries-lithium-ion-le-quebec-terre-promise> (Consulté le 08/06/16). Site officiel de l'Association des Véhicules Électriques du Québec.

Automobile-magazine. (s.d.). Range extender / prolongateur d'autonomie. En ligne http://www.automobile-magazine.fr/les_plus/lexique/range_extender_prolongateur_d_autonomie (Consulté le 09/06/16).

Automobile-propre. (s.d.). La recharge des voitures électriques. En ligne <http://www.automobile-propre.com/dossiers/voitures-electriques/recharge-voitures-electriques/> (Consulté le 10/06/16).

Automobile-propre. (s.d.). L'autonomie d'une voiture électrique. En ligne http://www.automobile-propre.com/dossiers/voitures-electriques/autonomie-voiture-electrique/#Les_solutions_techniques_pour_rallonger_lautonomie (Consulté le 15/06/16).

Automobile-propre. (s.d.). Voiture Hydrogène. En ligne <http://www.automobile-propre.com/voiture-hydrogene/> (Consulté le 21/05/16).

Badey, Q. (2012). Etude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries Lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile (Thèse de Doctorat). Université de Paris Sud. Disponible à https://hal.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/693344/filename/VA2_BADEY_QUENTIN_22032012.pdf.

Belaoui, M. (2015). Modélisation électrochimique et thermique d'une batterie lithium ion (Thèse de Mémoire). Université de Tlemcen. Disponible à http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/8296/1/Modelisation_electrochimique_et_thermique_dune_batterie_lithium_ion.pdf.

Bloomberg New Energy Finance [BNEF]. (2016). Electric Vehicles to be 35% of global new car sales by 2040. En ligne <http://about.bnef.com/press-releases/electric-vehicles-to-be-35-of-global-new-car-sales-by-2040/> (Consulté le 04/06/16).

Boucher, S. (2015). Voiture électrique : bientôt moins chère que la voiture classique – Étude. En ligne <http://www.consoglobe.com/voiture-electrique-bientot-moins-chere-cg> (Consulté le 18/06/16).

- Bureau fédéral du Plan, & Service public fédéral Mobilité et Transports. (2012). Perspectives de l'évolution de la demande de transport en Belgique à l'horizon 2030. Disponible à http://www.plan.be/admin/uploaded/201209171118110.For_Transport_1230_10201_F.pdf. Site officiel du Bureau fédéral du Plan.
- Callmepower. (2015). Les GRD et intercommunales de l'électricité et du gaz. En ligne <http://callmepower.be/fr/fournisseur#id3> (Consulté le 22/06/16). Site officiel de Callmepower, comparateur d'offres d'énergie en Belgique.
- Callmepower. (2016). ORES scrl, gestionnaire de réseaux de distribution de gaz et d'électricité en région Wallonne. En ligne <http://callmepower.be/fr/fournisseur/ores> (Consulté le 22/06/16). Site officiel de Callmepower, comparateur d'offres d'énergie en Belgique.
- Campeol, V. (2015). Testez la voiture électrique et plug-in! En ligne http://www.beci.be/centre_de_connaissance/mobilite/vehicule_electrique/testez_la_voiture_electrique_et_plug_in/ (Consulté le 02/06/16). Site officiel de la Chambre de Commerce & Union des Entreprises de Bruxelles (BECI).
- Chargemap. (2016). Statistique sur les bornes de recharge en Belgique. En ligne <https://fr.chargemap.com/about/stats/belgique> (Consulté le 15/06/16). Site proposant un service destiné à la localisation de tous les points de recharge publics pour les véhicules électriques dans le monde entier.
- Chevalier, J. (2015). Voiture électrique : des chercheurs annoncent la mise au point d'une batterie miracle. En ligne http://www.lepoint.fr/automobile/des-chercheursannoncent-la-mise-au-point-d-une-batterie-miracle-30-10-2015-1978015_646.php (Consulté le 10/06/16). Site officiel du magazine hebdomadaire français d'information générale.
- Chèze, B., Gastineau, P., & Tchung-Ming, S. (2015). Policy scenarios to sustain EV deployment. Disponible à http://projet.ifpen.fr/Projet/upload/docs/application/pdf/2015-10/sselectra_d4_1_policy_scenarios_to_sustain_ev_deployment.pdf.
- Commission Européenne. (2011). White Paper: Roadmap to a Single European Transport Area. En ligne <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52011DC0144> (Consulté le 21/05/16).
- Commission Européenne. (2013). L'UE lance une stratégie pour des carburants propres. En ligne http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-40_fr.htm#footnote-1 (Consulté le 11/06/16). Site officiel de la Commission Européenne.
- Commission Européenne. (2016). Paquet sur le climat et l'énergie à l'horizon 2020. En ligne http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020/index_fr.htm (Consulté le 02/06/16). Site officiel de la Commission Européenne.

- Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz [CREG]. (s.d.). Comprendre le marché libéralisé de l'électricité et du gaz naturel: qui fait quoi ? En ligne <http://www.creg.be/fr/wiedoetwat.html> (Consulté le 22/06/16). Site officiel de la CREG, l'autorité fédérale de régulation des marchés de l'électricité et du gaz naturel en Belgique.
- Commission de Régulation de l'Énergie [CRE]. (s.d.). La technologie V2G ou le véhicule électrique comme levier pour optimiser les réseaux. En ligne <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=vehicules-electriques-v2g> (Consulté le 16/07/16).
- Cornelis, E. (2010). La mobilité en Belgique en 2010 : résultats de l'enquête BELDAM. Disponible à http://www.beldam.be/Rapport_final.pdf.
- CREG. (2016). Rapport annuel 2015. Disponible à http://www.creg-ar.be/2015/images/pdf/CREG-AR-2015_fr.pdf. Site officiel de la CREG, l'autorité fédérale de régulation des marchés de l'électricité et du gaz naturel en Belgique.
- Croisé, N. (2015). La voiture électrique progresse en Europe dans un marché encore fragile. En ligne <http://bfmbusiness.bfmtv.com/entreprise/la-voiture-electrique-progresse-en-europe-dans-un-marche-encore-fragile-895044.html> (Consulté le 21/05/16).
- Devogelaer, D., & Gusbin, D. (2015). 2030 Climate and Energy Framework for Belgium : Impact assessment of a selection of policy scenarios up to 2050. Disponible à http://www.plan.be/admin/uploaded/201504270958240.WP_1503_10941.pdf. Site officiel du Bureau fédéral du Plan.
- Ecorenove. (2016). Quel bilan écologique pour la voiture électrique ? En ligne <http://www.ecorenove.fr/bilan-ecologique-voiture-electrique/> (Consulté le 18/06/16).
- Elia. (s.d.). Acteurs du marché de l'électricité. En ligne <http://www.elia.be/fr/a-propos-elia/electricity-market-players#anchor5> (Consulté le 18/06/16). Site officiel d'Elia, gestionnaire du réseau de transport d'électricité à haute tension en Belgique.
- Elia. (s.d.). Charge du réseau Elia. En ligne <http://www.elia.be/fr/grid-data/Charge-du-reseau-et-previsions-de-charge/Charge-du-reseau-Elia> (Consulté le 26/07/16). Site officiel d'Elia, gestionnaire du réseau de transport d'électricité à haute tension en Belgique.
- Elia. (s.d.). Elia un monde plein d'énergie. Disponible à <http://www.elia.be/~media/files/Elia/publications-2/brochures/elia%20un%20monde%20plein%20denergie.pdf>. Site officiel d'Elia, gestionnaire du réseau de transport d'électricité à haute tension en Belgique.

- Elia. (s.d.). Infeed. En ligne <http://www.elia.be/fr/grid-data/balancing/Infeed> (Consulté le 26/07/16). Site officiel d'Elia, gestionnaire du réseau de transport d'électricité à haute tension en Belgique.
- Expert-ve. (s.d.). Prolongateur d'autonomie ou Range Extender. En ligne <http://www.expert-ve.fr/range-extender-plugin-hybrid.html> (Consulté le 09/06/16).
- Fédération Belge des Entreprises Électriques et Gazières [FEBEG]. (s.d.). Secteur de l'électricité. En ligne <https://www.febeg.be/fr/secteur-de-lelectricite> (Consulté le 21/06/16). Site officiel de la FEBEG.
- FEBEG. (s.d.). Statistiques électricité. En ligne <https://www.febeg.be/fr/statistiques-electricite> (Consulté le 20/06/16). Site officiel de la FEBEG.
- FEBEG. (s.d.). Transport et distribution de l'électricité. En ligne <https://www.febeg.be/fr/transport-et-distribution-de-lelectricite> (Consulté le 18/06/16). Site officiel de la FEBEG.
- Fédération Belge de l'Industrie de l'Automobile et du Cycle [FEBIAC]. (2011). Vers un Clean Vehicle Plan pour la Région Bruxelles-Capitale. Document non publié.
- FEBIAC. (2016). Datadigest 2016. En ligne <http://www.febiac.be/public/statistics.aspx?FID=23&lang=FR> (Consulté le 02/06/16). Site officiel de la FEBIAC.
- Fiches-auto. (s.d.). Voitures Hybrides. En ligne <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/voitures-hybrides-electriques/s-616-voitures-hybrides.php> (Consulté le 20/05/16).
- Futura-Sciences. (s.d.). Voiture hybride. En ligne <http://www.futura-sciences.com/magazines/environnement/infos/dico/d/energie-renouvelable-voiture-hybride-7282/> (Consulté le 05/06/16).
- Huault-Dupuis, G. (2014). La voiture électrique : 180 ans d'histoire. En ligne http://lifestyle.boursorama.com/article/la-voiture-electrique-retour-sur-plus-de-180-ans-d-histoire_a1059/1 (Consulté le 16/05/16).
- IFP Energies Nouvelles [IFPEN]. (s.d.). Les moteurs conventionnels. En ligne <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Automobile-et-carburants/Les-moteurs-conventionnels#5> (Consulté le 08/06/16). Site officiel de l'IFPEN, acteur majeur de la recherche et de la formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement.
- Kempton, W., & Tomić, J. (2005). Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. *Journal of power sources*. Disponible à <http://www1.udel.edu/V2G/KempTom-V2G-Fundamentals05.PDF>.

- Le Moniteur Automobile. (2016). Spécial Green : L'état du marché belge. Le Moniteur Automobile, N°1627, 27-33.
- Lilien, J. L. (2013). Transport et distribution de l'énergie électrique. Cours donné à l'Institut d'Électricité Montefiore, Université de Liège. Disponible à http://www.tdee.ulg.ac.be/userfiles/file/cours_tdee.pdf.
- Masson, L. J. (2013). Recharge une électrique : sur n'importe quelle prise ? En ligne <http://www.moteurnature.com/actu/2013/wallbox-borne-de-charge-recharge.php> (Consulté le 10/06/16). Site sur l'actualité de l'écologie automobile.
- McKinsey & Company, & Amsterdam Rountables Foundation. (2014). Electric vehicles in Europe : gearing up for a new phase ? Disponible à http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:s2_ruFjQ2X8J:www.mckinsey.com/~media/McKinsey%2520Offices/Netherlands/Latest%2520thinking/PDFs/Electric-Vehicle-Report-EN_AS%2520FINAL.ashx+&cd=1&hl=fr&ct=clnk&gl=be.
- Mennekes. (2015). Électro-Mobilité. Disponible à http://www.mennekes.de/uploads/media/Electro-mobilit%C3%A9_F_2015.pdf. Site officiel de Mennekes, leader mondial dans la fabrication de produits électriques industriels.
- Nègre, L. (2011). Livre Vert sur les infrastructures de recharge ouvertes au public pour les véhicules « décarbonés ». Disponible à http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Livre_vert_L-NEGRE_Infrastrucutres_recharge_pour_les_vehicules_decarbones.pdf.
- Notre-planete.info. (s.d.). Véhicule à motorisation semi-hybride. En ligne https://www.notre-planete.info/environnement/definition_vehicule_motorisation_semi-hybride (Consulté le 20/05/16).
- Observatoire du Véhicule d'Entreprise [OVE]. (s.d.). Les micro hybrides. En ligne <http://www.observatoire-vehicule-entreprise.com/les-micro-hybrides> (Consulté le 20/05/16). Site officiel de l'OVE.
- Opérateur des Réseaux Gaz et Électricité [ORES]. (2014). Vademecum : Guide pratique de la mobilité électrique en Wallonie. Disponible à https://netoresorchardcms.blob.core.windows.net/media/Default/Formulaires/Vademecum_ORES_Mobilite_FR_web.pdf.
- PrixInnovateurs. (2016). Les batteries lithium-air, l'avenir du stockage de l'énergie. En ligne <https://prixdesinnovateurs.arcelormittal.com/2016/01/26/les-batteries-lithium-air-lavenir-du-stockage-de-lenergie/> (Consulté le 09/06/16). Site officiel de la thématique d'avenir choisie par ArcelorMittal pour le Stockage de l'Énergie.

- Régulateur Bruxellois pour les marchés du Gaz et de l'Électricité [BRUGEL]. (s.d.). Qu'est ce que le « Profil de Charge Synthétique » ? En ligne <http://www.brugel.be/fr/professionnels/releve-de-votre-compteur-de-gaz-et-d-electricite/qu-est-ce-que-le--%C2%A0profil-de-charge-synthetique> (Consulté le 03/08/16). Site officiel de BRUGEL, régulateur bruxellois pour l'énergie.
- Resa. (s.d.). Les acteurs du marché libéralisé. En ligne <http://www.resa.be/a-propos/les-acteurs-du-marche-liberalise/> (Consulté le 22/06/16). Site officiel de Resa, Opérateur des réseaux de distribution de gaz et d'électricité.
- Réseau de Transport d'Électricité [RTE]. (2014). Bilan Prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. Disponible à http://www.rte-france.com/sites/default/files/bilan_complet_2014.pdf. Site officiel de RTE, l'entreprise du réseau de transport d'électricité en France.
- Silver Spring Networks. (s.d.). Whitepaper : How the Smart Grid enables utilities to integrate electric vehicles. Disponible à <http://www.silverspringnet.com/wp-content/uploads/SilverSpring-Whitepaper-ElectricVehicles.pdf>. Site officiel de Silver Spring Networks, fournisseur de produits Smart Grid.
- SmartGrid.gov. (s.d.). What is the Smart Grid ? En ligne https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/plugin_electric_vehicles.html (Consulté le 16/07/16). SmartGrid.gov est une ressource d'information sur le Smart Grid et les projets Smart Grid parrainés par le gouvernement US.
- Spath, F. (2015). Voiture électrique : quand la batterie alimente nos maisons. En ligne <http://www.breezcar.com/actualites/article/vehicule-to-home-voiture-electrique-source-electricite-0315> (Consulté le 16/07/16).
- Synergrid. (2016). Régulateurs. En ligne http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=16820&language_code=FRA (Consulté le 21/06/16). Site officiel de Synergrid, fédération des gestionnaires de réseaux électricité et gaz en Belgique.
- Synergrid. (2016). Synthetic Load Profiles (SLP). En ligne http://www.synergrid.be/index.cfm?PageID=16896&language_code=FRA# (Consulté le 03/08/16). Site officiel de Synergrid, fédération des gestionnaires de réseaux électricité et gaz en Belgique.
- Turker, H. (2012). Véhicules Électriques Hybrides Rechargeables : évaluation des Impacts sur le Réseau électrique et Stratégies Optimales de recharge (Thèse de Doctorat). Université de Grenoble, Sciences de l'ingénieur. Disponible à https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00966055/file/THESE_TURKER_HARUN.pdf.
- Vincotte. (s.d.). Station de recharge pour véhicules électriques dans des installations domestiques. En ligne <https://vivreensecurite.vincotte.be/fr/nouvelles/station-de-recharge-pour-vehicules-electriques-dans-des-install> (Consulté le 15/06/16).

- Voiture-electrique.durable. (s.d.). Les batteries pour voitures électriques. En ligne <http://voiture-electrique.durable.com/a-les-batteries-pour-voitures-electriques> (Consulté le 21/05/16).
- Voiture-electrique.durable. (s.d.). Prix d'une voiture électrique. En ligne <http://voiture-electrique.durable.com/a-prix-d-une-voiture-electrique> (Consulté le 21/05/16).
- Voiture-electrique-populaire. (s.d.). La batterie. En ligne <http://www.voiture-electrique-populaire.fr/enjeux/technologie/batterie> (Consulté le 08/06/16).
- Wang, Z., & Wang, S. (2013). Grid Power Peak Shaving and Valley Filling Using Vehicle-to-Grid Systems. Disponible à <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6529206>.
- Wikipédia. (2005). Employé. En ligne (Consulté le 30/06/16) https://fr.wikipedia.org/wiki/Employ%C3%A9#cite_note-1.
- Wikipédia. (2015). Voiture électrique. En ligne (Consulté le 18/06/16) https://fr.wikipedia.org/wiki/Voiture_%C3%A9lectrique#Impact_environmental.
- Willems, M. (2016). Flandre: jusqu'à 5000 euro de prime à l'achat d'une voiture électrique. En ligne <http://www.link2fleet.com/flandre-une-prime-a-lachat-dune-voiture-electrique/> (Consulté le 21/05/16).