

Contents

1. INTRODUCTION	9
1.1. Étendu du projet :	9
2. CONTEXTE ACTUEL DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE	9
2.1. Bref historique de la voiture électrique	9
2.2. Réseau électrique suisse	10
2.3. Parc de véhicules routiers électriques en Suisse.....	11
2.4. Caractéristiques techniques des voitures électriques actuelles	12
3. BORNE DE RECHARGE	13
3.1. Fonctionnement technique	13
3.2. Types de recharge et de câbles	13
3.3. Etat actuel en Suisse	15
3.4. Enjeux du développement des bornes de recharge	15
3.5. Procédures d'installation	16
4. FUTURS DÉVELOPPEMENTS DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE	17
4.1. Hypothèses sur les voitures électriques futures	17
4.2. Prédications sur l'évolution de la voiture électrique en Suisse.....	19
4.3. Opinion de la collectivité sur la voiture électrique	19
4.4. Impact sur la consommation électrique suisse	21
5. DÉFINITION DES SCÉNARIOS ENVISAGEABLES.....	22
5.1. Réseaux les plus touchés	22
5.2. Scénarios	23
5.3. Solutions applicables	24

6.	SIMULATION DE L'IMPACT SUR LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES	25
6.1.	Quartiers d'habitations de villages	25
6.2.	Quartiers d'habitations de ville	31
6.3.	Quartiers industriel	37
6.4.	Centre commercial	40
6.5.	Station-service	42
7.	DIFFICULTÉS D'IMPLÉMENTATIONS ET DÉFAUTS DES SOLUTIONS	47
7.1.	Système de gestion énergétique (EMS).....	47
7.2.	Ajout d'une production énergétique renouvelable	47
7.3.	Système de stockage énergétique	47
7.4.	Renforcement du réseau	47
8.	CONCLUSION	48
9.	REMERCIEMENTS.....	49
10.	ANNEXES	49
10.1.	Parc de véhicule électrique suisse	49
10.2.	Courbe de charge centrale photovoltaïque	49
10.3.	Courbes de charges journalières moyennes	49
10.4.	Courbe de fréquentation d'une station-service	51
11.	SOURCES.....	52

1. Introduction

Depuis 2010, la conscience écologique ainsi que la fluctuation des prix des énergies fossiles ont favorisé le développement de la technologie de stockage électrique. L'arrivée des batteries Li-ion a alors rendu possible la mise au point de la voiture électrique jusque-là jugée impraticable à large échelle. L'opinion publique favorable, la technologie proche de la maturité et un clair intérêt financier ont propulsé cette mobilité électrique sur les marchés mondiaux.

Cependant, un frein majeur de cette mobilité réside dans la mise en place de bornes de recharge en quantités suffisantes pour que les conducteurs ne risquent pas d'être incommodés. Une vague d'installation de ces bornes est actuellement en cours mais de telles ponctions de puissances risquent de poser des problèmes aux réseaux électriques locaux qui n'ont pas été dimensionnés pour cela.

Ce travail de bachelor vise à déterminer l'urgence et l'échelle de ce problème puis à isoler les solutions optimales et simuler leurs effets.

1.1. Étendu du projet :

Ce projet se focalise sur le marché suisse mais comme le marché français l'influence grandement, ce dernier sera légèrement étudié. L'analyse conduite englobera le développement de la voiture électrique depuis sa création à nos jours, son acceptation au sein de la communauté, l'état de l'art de sa technologie et enfin son évolution probable.

Les réseaux électriques simulés seront limités aux archétypes les plus communs comme les villes, les villages et les quartiers industriels. Les cas plus spécifiques comme aux abords d'une centrale hydraulique ne seront pas traités.

Les réseaux électriques étudiés seront uniquement en basse tension et les simulations étudieront la capacité des transformateur MT/BT à supporter la mobilité électrique. La surtension ou sous-tension des câbles en basse tension ainsi que l'impact sur les lignes et transformateur moyennes tension et supérieures ne seront pas traités.

2. Contexte actuel de la mobilité électrique

2.1. Bref historique de la voiture électrique¹

La première voiture électrique fut construite en 1842 par Davenport et Robert Davison. Les voitures thermiques n'étaient alors pas encore inventées et les seules concurrentes étaient les voitures à vapeur. Les voitures électriques furent commercialisées en 1852 et connurent leur premier essor durant les années qui suivirent. La première marque de voitures électriques française fut créée en 1893 et une flotte de taxis électriques fut déployées en 1897 à New-York.

Un record d'autonomie de 300 km fut atteint en 1900 pour une vitesse supérieure à 100km/h. Les voitures électriques étaient appréciées de par leur propreté (pas de problème d'huile ni d'odeur, fréquents à l'époque), ainsi que leur facilité d'allumage. Le marché américain de la voiture de l'époque était composé de 38% de voitures électriques, 40% de voitures à vapeur et 22% de voitures à essence.

Cependant, l'invention du démarreur électrique ainsi que la production à la chaîne de Ford en 1910 propulsa la voiture thermique qui finit par complètement supplanter la voiture électrique. Celle-ci ne représentait en 1913 déjà plus que 1% du marché américain.

Ce n'est qu'en 1960 qu'un intérêt pour les voitures électriques réapparut, poussé par un changement d'opinion sur les voitures thermiques. Préalablement un symbole de puissance et de liberté, celles-ci étaient alors associées à la violence, la pollution et au danger. Le choc pétrolier de 1973 renforça cette motivation de trouver des alternatives à la voiture thermique. La production de voitures électriques restera malgré tout insignifiante même si de nombreuses mesures furent prises par divers états pour favoriser l'émergence de la voiture électrique.

Depuis 2010, les nouvelles découvertes technologiques et l'avancée de la pensée écologique ont poussé la voiture électrique qui est désormais associée à une mobilité peu chère, propre et non-néfaste à l'environnement. Elle est cependant encore freinée par son prix, son autonomie plus faible ainsi que les difficultés de recharge.

Le concept de la voiture électrique existe depuis de nombreuses années mais c'est uniquement dans la dernière décennie qu'il est devenu notable dans la conscience commune. Cela se reflète dans la composition du parc routier suisse.

2.2. Réseau électrique suisse²

L'électricité est devenue un élément vital de notre société et son importance est reflétée dans la structure du réseau électrique suisse. Ce dernier fut construit progressivement mais sa robustesse a toujours été la principale priorité. Il s'est complexifié au fil du temps jusqu'à sa forme actuelle.

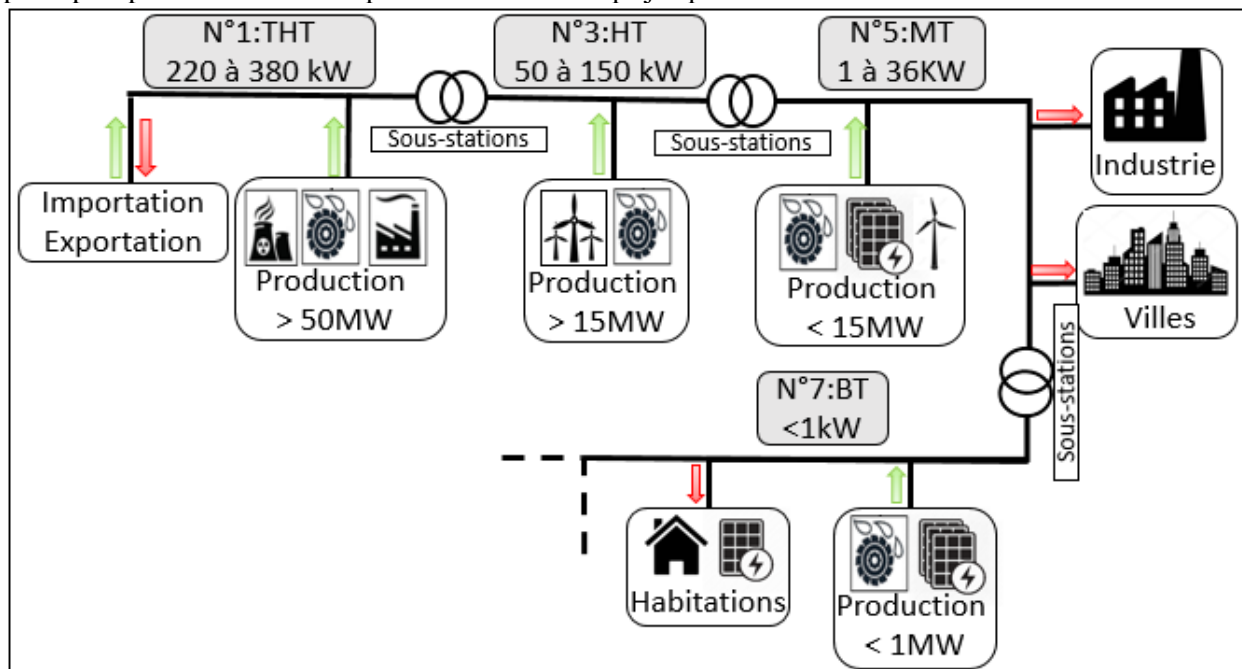


Figure 1: Schéma simplifié du réseau électrique suisse et de ses principaux acteurs

Le réseau électrique suisse est conforme à l'infrastructure classique dite PTDU (Production, Transport, Distribution, Consommation). Ses buts primordiaux sont :

- ❖ Garantir la fourniture d'énergie à tout consommateur relié
- ❖ Suivre et s'adapter aux fluctuations temporelles de la demande
- ❖ Garantir la qualité d'alimentation en gérant :
 - Les fluctuations de la fréquence autour des 50Hz
 - Les fluctuations de la tension autour de la valeur nominale selon le niveau de réseau
- ❖ Minimiser les coûts monétaires et écologiques

Le réseau est divisé en 4 niveaux de tension qui sont séparés par des postes de couplage ou sous-stations qui à l'aide de transformateurs font passer la tension d'un niveau à l'autre.

THT (Très Haute Tension/220 à 350kW) :

Ce niveau est utilisé pour le transport de l'électricité sur de grande distance comme c'est le cas pour un échange entre pays. La haute tension permet une diminution des pertes. Les producteurs de grandes tailles comme les centrales nucléaires y sont directement reliées.

HT (Haute Tension/50 à 150KW) :

Ce niveau est utilisé pour le transport suprarégional et il alimente les distributeurs cantonaux, régionaux et municipaux ainsi que les grandes installations industrielles.

MT (Moyenne Tension/10 à 35kW) :

Ce niveau est utilisé pour la distribution régionale du courant. Il alimente les villes et les villages ainsi que des installations industrielles de tailles moyennes/petites.

BT (Basse Tension/1k et moins) :

Ce niveau alimente en 400V les foyers, les commerces, et autres consommateurs de petites tailles.

Cependant, le réseau a été pensé et construit pour permettre à un gros producteur en début de ligne d'alimenter un consommateur à la fin de cette dernière. L'ajout récent d'énergie renouvelable en moyennes et basses tensions n'était pas prévu et leur inclusion peut s'avérer problématique. Des flux de puissance venant des basses puissances vers les plus hautes pourraient ne pas être détectés et provoquer des dommages. Il en va de même pour les recharges de voitures électriques qui demandent des puissances dignes de la THT à des réseaux BT.

2.3. Parc de véhicules routiers électriques en Suisse³

Les voitures électriques existent dans le pays depuis de nombreuses années mais ce n'est qu'à partir de 2010 que leur nombre a commencé à drastiquement augmenter. En 7 ans, il est passé de 650 à 14'600 véhicules avec une augmentation moyenne de 50% par année. Cette croissance éclair s'est cependant calmée en 2017 avec une augmentation de 35%.

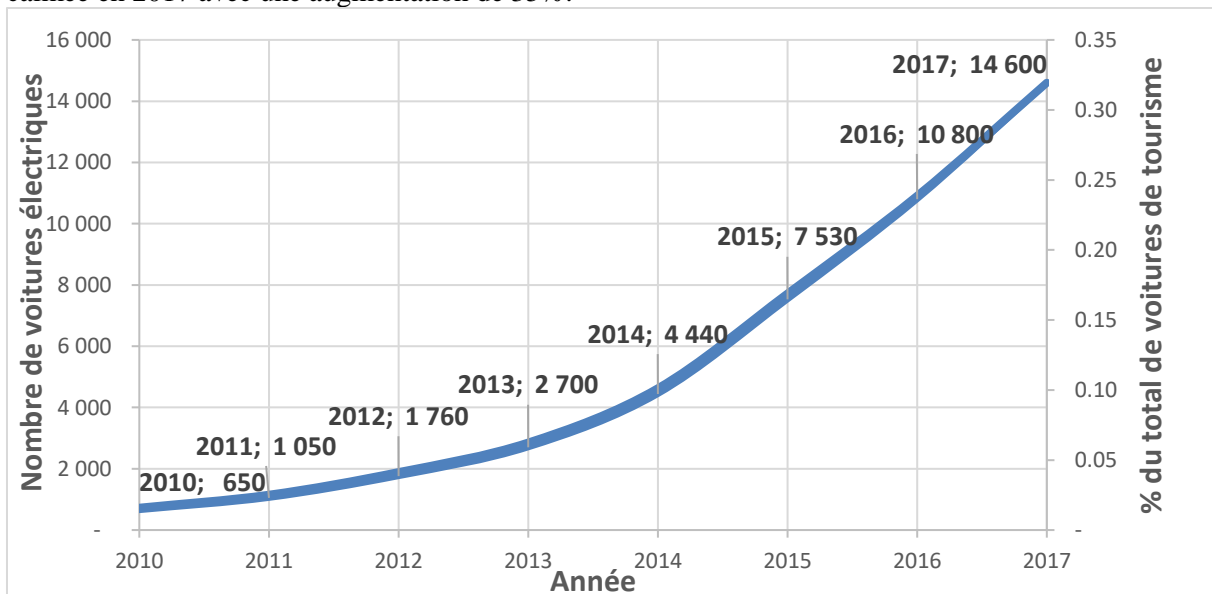


Figure 2: Evolution du nombre de voitures électriques en Suisse. Tableau de données en annexe 1

2.4. Caractéristiques techniques des voitures électriques actuelles⁴

Le marché de la voiture électrique s'est beaucoup développé dans les dernières années et aujourd'hui presque chaque fabricant de voitures a lancé son propre modèle électrique.

Deux catégories se distinguent malgré tout. Les voitures électriques plus proche de la classe moyenne qui possèdent une capacité de batterie entre 30 et 50kWh comme la Renault ZOE. Ces voitures restent plus chères qu'un modèle à essence classique mais la différence n'est plus insurmontable pour le conducteur moyen.

La deuxième catégorie représente les voitures électriques de luxe et le constructeur Tesla monopolise ce marché. Ses voitures possèdent les plus hautes capacités (100kWh) ainsi que la meilleure autonomie mais également le plus haut prix sur le marché.

Le tableau suivant regroupe les caractéristiques principales des 9 voitures électriques les plus vendues en Suisse et en France.

Voiture	Capacité kWh	Pcharge sur prises						Autonomie		Efficacité kWh/km	Pcharge max kW
		Domestique	Wallbox		Publique		Charge rapide	NEDC	Réelle		
		2.3 kW	3.2 kW	7.4 kW	11 kW	22 kW	50 kW	km	km		
		heure									
Tesla Model S	100	96	31.3	10.7	9.1	4.5	1.3	613	356	28.1	125
Renault ZOE	41	24	14.3	6.3	3.3	1.7	1.1	400	300	13.6	43
Nissan Leaf (2018)	40	20	16.0	8.0	3.6	1.8	0.7	378	240	18.6	50
Volkswagen e-Golf	36	17	10.8	5.2	3.3	1.6	0.8	300	200	17.9	50
BMW i3	33	10	7.3	3.5	2.5	1.5	0.7	300	200	12.9	50
Hyundai Ioniq	28	7	8.8	5.0	2.5	1.3	0.4	280	200	12.5	100
Kia Soul EV	27	8	8.4	3.6	2.5	1.2	0.5	200	110	24.5	80
Citroën C-Zero	15	11	4.5	2.0	1.3	0.7	0.5	150	83	17.5	50
Moyenne	31	24	10	4.8	2.7	1.4	0.7	287	190	16.8	60

Tableau 1 : Caractéristiques des 9 voitures électriques les plus vendu en Suisse. (Italique=valeurs calculées, 0.5 h=30 min).

Les caractéristiques les plus cruciales des voitures électriques sont leurs capacités et leurs puissances de charge et décharge. Ces deux propriétés sont liées à la batterie de la voiture et sont interdépendantes. En effet, une batterie conçue pour avoir une grande capacité aura en retour une puissance plus faible et vice-versa. Cependant, les besoins des utilisateurs impliquent une grande capacité pour que la voiture ait une autonomie suffisante. Or, les conducteurs veulent également pouvoir recharger rapidement leurs véhicules pour continuer à rouler. Un équilibre doit donc être maintenu entre ces deux caractéristiques, car les deux sont nécessaires.

L'autonomie est estimée majoritairement par le test NEDC. Ce dernier correspond au test actuellement exigé par les normes pour déterminer l'autonomie d'une voiture électrique. Ce test s'est avéré insuffisant, car il se déroule dans des conditions idéales peu représentatives des circonstances réelles de conduites.

La puissance de charge des voitures électriques est actuellement insuffisante et doit encore être relevée pour permettre les fameuses recharges ultra-rapides en moins de 15 minutes. De plus, l'augmentation constante de la capacité aggrave ce besoin de puissance.

Les voitures électriques vont continuer à améliorer ces deux priorités dans le futur et deux hypothèses peuvent être tirées sur ce développement. Elles seront traitées au point 4.

3. Borne de recharge⁵

3.1. Fonctionnement technique

Une borne de recharge reste un concept très simple. Il s'agit d'une station relais qui envoie la bonne tension et le bon courant à la voiture électrique. Elle est normalement directement reliée au tableau électrique dans le cadre privé. La borne comprend un ou plusieurs câbles de charge dont la forme est similaire aux pistolets d'une borne à essence et elle consiste en un boîtier fixé au mur ou un pilier ancré au sol (voir figure 3). Selon le modèle, une interface indique à l'utilisateur diverses informations sur l'état de la voiture et le déroulement de la décharge. Une intelligence interne peut permettre un monitoring à distance. La borne intègre d'office un dispositif de surveillance de fuite afin de réduire les risques d'électrisation. De plus, l'utilisateur ne peut pas être exposé aux hauts courants, car les broches des prises ne sont mises sous tension que lorsqu'elles sont correctement raccordées au véhicule.



Figure 3: Exemples de bornes de recharge types "murale" et "pilier".⁶

Selon le type de bornes de recharge, un convertisseur peut être inclus. En effet, les batteries de voiture électrique nécessitent une alimentation en DC. Un convertisseur est généralement déjà présent dans le véhicule. Cependant, une recharge triphasée n'est possible que si la conversion est faite par la borne, le convertisseur de la voiture électrique ne convertissant qu'une seule phase.

3.2. Types de recharge et de câbles⁷

Les bornes de recharge sont tout d'abord séparées selon leur puissance de charge. Une classification a donc été mise en place pour catégoriser ces bornes.

Charge		Nombre en Suisse
Lente	<22kW	1011
Rapide	50kW	52
Super-rapide	150kW	25
Ultra-rapide	350kW	4

Tableau 2: Type de recharge de voitures électriques

Sachant qu'il existe en 2018 en Suisse 1092 bornes de recharge publiques, il y a donc une moyenne de 14 conducteurs pour une borne de recharge. Cependant, cela ne prend pas en compte la recharge à la maison qui représente 90%⁸ des recharges effectuées.

Mais chaque type de recharge nécessite un câble adapté à ses besoins.

3.2.1. Câbles de recharge⁹

Il existe actuellement 4 types majeurs de câble pour les bornes de recharge :

Type 1 : Il s'agit de l'ancien standard qui fut installé sur les premières voitures électriques. Il est progressivement remplacé par les prises de type 2 et était utilisé pour les faibles puissances uniquement.

Type 2 : C'est le nouveau standard européen qui s'est imposé ces dernières années. Il a le mérite de permettre la recharge monophasée et triphasée, en plus d'être compatible avec les anciennes voitures avec prises de type 1.

CHAdEMO : C'est le standard japonais qui ne transmet que du courant en continu. Il n'est utilisé que pour les plus hautes puissances de charge.

CCS (combo) : Ce nouveau type de prise est capable d'alimenter une voiture en monophasé ou triphasé, en alternatif comme en continu. Il s'agit de l'équipement standard des bornes de recharge ultra-rapides mais il reste compatible avec les prise de type 2.

Prises	Description	Phase	$P_{maximum}$	$U_{maximum}$	Type de charge
			kW	V	
Type 1	Ancien standard	mono	7.4	230	Lente
Type 2	Standard Européen	mon/tri	43	400	Lente-rapide
CHAdEMO	Standard japonais	DC	P_{max} véhicule	500	Super-ultra rapide
CCS(Combo)	Nouvelle variante	mon/tri/DC	P_{max} véhicule	AC400V/DC850V	Lente-ultra rapide

Tableau 3 : Spécifications techniques câbles de recharge¹⁰

3.2.2. Mode 1 : Recharge classique (AC, monophasé, 2.3kW, 10A)

Ce mode encadre la recharge dite « classique ». La voiture électrique est simplement branchée sur une banale prise monophasée de l'habitation. Le convertisseur est directement installé dans la voiture.

Ce mode de recharge est le plus simple à mettre en place mais il est également le moins efficace. Il est de moins en moins applicable avec la montée croissante des capacités de batterie.

3.2.3. Mode 2 : Recharge d'urgence (AC, monophasé, 3.7kW, 16A)

Ce mode est semblable à une recharge de secours, utilisé pour les urgences en route. Un chargeur branché sur une prise classique permet un meilleur ampérage et donc une recharge plus rapide. Cependant, ce type de recharge n'est pas adapté pour des recharges régulières pour des raisons de sécurité. Le mode 3 est préférable pour cette fonction.

3.2.4. Mode 3 : Recharge à domicile (AC/DC, triphasé, 11kW-22kW, 16A-32A)

Il s'agit du mode optimal pour la recharge lente au domicile. Une borne de recharge est installée sur place (majoritairement sous la forme d'une Wallbox¹¹) et elle alimente la voiture. La tension AC est convertie en DC par la borne avant d'être transmise à la voiture. Cela permet une alimentation en triphasé de 11kW à 22kW. Cependant, les tableaux électriques des habitations sont typiquement équipés de boîtiers de distribution avec une limitation d'ampérage de 25A. La procédure pour augmenter cette limite ainsi que les travaux impliqués augmentent drastiquement le prix de la borne. Celle-ci passe de 1500 à 2000 CHF. - pour une borne classique à plus de 10'000 CHF. - pour une borne 22KW.

Une alimentation en monophasé reste également possible.

Bornes de recharge domestiques				
Recharge	I_{Phase}	I_{Total}	Tension	Puissance
	A	A	V	kW
Prise classique	10	10	230	2.3
11kW monophasé	16	16	230	3.7
11kW triphasé	16	27	400	11.1
22kW monophasé	32	32	230	7.3
22kW triphasé	32	55	400	22.2

Tableau 4: Puissances disponibles pour la recharge à domicile.

Il est important de déterminer qui de la voiture ou de la borne de recharge convertit le courant alternatif en courant continu. Si la voiture est alimentée en courant alternatif, même si ce dernier est triphasé, elle ne convertira qu'une des phases. Ainsi, une alimentation de 22kW triphasée ne fournirait en réalité que 7.3kW à la voiture. Si le courant est converti en continu dans la borne, la recharge reste à valeur optimale et 22kW sont transmis à la voiture électrique.

3.2.5. Mode 4 : Recharge rapide (DC,50kW/150kW /350kW)

Cette recharge est majoritairement présente sur les autoroutes pour permettre aux voyageurs longues distances de remplir rapidement leurs batteries. Ces recharges doivent pouvoir se faire en moins de 30 minutes afin de faciliter le transit.

3.3. Etat actuel en Suisse

Il existait 1092 bornes de recharge publiques à travers le pays en Mai 2018. Ces bornes sont plus ou moins accessibles par les automobilistes car les organisations qui gèrent ces bornes ne sont pas toutes collaboratrices.

Service	Entreprise	Nombre de bornes
EV pass	Green motion	733
Move	Alpiq et différents distributeurs locaux	330
Go Fast	Gottard Fast	10
Ionity	BMW,Ford Motor Companx, Daimler AG et Volkswagen	4
Tesla supercharger	Tesla inc	15
Total	5 services majeurs	1092

Tableau 5: Répartition des bornes de recharge suisse selon leur puissance et propriétaire¹²

3.4. Enjeux du développement des bornes de recharge

Le développement ainsi que la propagation des bornes de recharges sont deux des éléments les plus discutés par le public et les entreprises concernées. Le frein le plus fort à l'expansion de la voiture électrique est la peur des futurs propriétaires qu'ils se retrouveront en panne au milieu de nulle part sans espoir de repartir. Cette peur était légitime est parfaitement fondée lorsque les premiers modèles de véhicules électriques sont apparus mais cela est amené à changer.

Les futurs modèles posséderont des capacités suffisantes pour qu'une recharge complète soit suffisante pour toutes utilisations autres qu'un voyage à l'étranger. Auxquels cas, une station-service sur une autoroute sera nécessaire pour une recharge ultra-rapide. Les bornes publiques de faibles puissances ne seront donc utilisées que pour les cas d'urgence ou par les véhicules à faibles capacités qui sont amenés à disparaître.

Cependant, même si ces bornes de recharges publiques ne seront au final que peu utilisées, les consommateurs n'achèteront pas de voitures électriques tant qu'elles ne seront pas aussi répandues que les stations-essence classiques. C'est pour répondre à ce sentiment que les groupes comme Green motion annoncent des implémentations massives à court terme (Green motion promet 3000 bornes dans le pays en 2020¹³). Des centres de recharges de grande taille comme celui de Bâle prévu pour 2023¹⁴ sont annoncés pour rassurer les conducteurs.

3.5. Procédures d'installation^{15 16}

3.5.1. Bornes publiques

L'installation d'une borne de recharge publique doit répondre à un certain nombre de normes ainsi qu'aux critères suivants:

- ❖ La fréquentation : l'installation doit être dimensionnée en fonction du nombre d'utilisateurs attendus.
- ❖ Le temps de recharge moyen : Le temps d'occupation selon le jour et les heures doit être évalué.
- ❖ Le maintien de la circulation : La borne ne doit pas entraver le réseau routier.
- ❖ L'utilisation durant l'hiver : La borne ne doit pas devenir un dépôt à neige et entraver les opérations de déneigement.
- ❖ La protection de la borne : Les chocs et dommages éventuels doivent être anticipés.
- ❖ L'impact sur la circulation piétonne : Les piétons ne doivent pas être entravés par la borne et celle-ci ne devrait pas être placée près de grosses artères piétonnes afin d'éviter le vandalisme.
- ❖ L'accès au réseau mobile : Si la borne a besoin de se connecter pour échanger des informations.
- ❖ La faisabilité des travaux : Les travaux civils doivent être évalués et jugés raisonnables.
- ❖ La proximité au tableau de distribution : Une grande distance entre le tableau et la borne doit être évitée pour diminuer les coûts et les pertes.
- ❖ La visibilité de la borne : La borne doit être facilement détectable pour les clients.

3.5.2. Bornes privées

L'installation d'une borne privée doit également répondre à certaines normes et suivre les précautions suivantes :

- ❖ Prendre connaissance du guide d'installation fourni par le constructeur de la borne de recharge.
- ❖ S'assurer que la borne possède une cote de résistance aux intempéries appropriée.
- ❖ Calculer la charge totale et s'assurer qu'il y a un tableau de distribution électrique adéquat à proximité, sans quoi il faut prévoir les coûts liés à la mise à niveau du tableau et du branchement électrique.
- ❖ Prévoir les canalisations et les excavations éventuellement nécessaires.
- ❖ Prévoir une chaussée appropriée autour de la borne pour que les automobilistes puissent s'y rendre sans encombre.
- ❖ Obtenir les permis municipaux nécessaires.
- ❖ S'assurer que tout entrepreneur retenu détient les permis appropriés aux travaux à effectuer.
- ❖ Protéger la borne des dommages potentiels d'un impact de véhicule. Par exemple, prévoir une protection physique, un dégagement de sûreté ou une installation surélevée.
- ❖ Dans le cas d'une borne intelligente, prévoir un accès à l'infrastructure de télécommunications appropriée, le cas échéant.
- ❖ Prévoir un éclairage adéquat de la borne et de son voisinage.
- ❖ Identifier clairement la zone de stationnement au sol et à l'aide de panneaux indicateurs

4. Futurs développements de la mobilité électrique

4.1. Hypothèses sur les voitures électriques futures

4.1.1. La « familiale »

4.1.1.1. Description

La voiture électrique familiale est un modèle développé pour la classe moyenne. Cette voiture possède une capacité suffisante pour assurer les déplacements quotidiens du travailleur moyen avec enfants en gardant une marge. Les performances de la batterie en capacité et en puissance ont été optimisées pour une recharge lente à la maison afin de diminuer les coûts et augmenter l'efficacité de la batterie. En conséquence, les recharges rapides sur bornes seront plus lentes.

La « familiale » est amenée à représenter la majorité du parc de voiture électrique dans le futur du fait de son prix plus abordable et sa simplicité.

4.1.1.2. Caractéristiques et performances

Modèle	Capacité	P_{charge}	Efficacité	Autonomie	Temps de charge			
					2.3kW	11kW	22kW	150kW (80%)
	kWh	kW	kWh/100km	km	heure			minute
Familiale	50	100	14	350	24	5	3	30

Tableau 6:Caractéristiques techniques voiture électrique modèle familiale.

Le modèle familiale est optimisé pour une conduite en ville est une activité de transport de matériel. Il possède un grand coffre et une bonne maniabilité. Sa batterie possède une capacité de 50kWh qui permet une autonomie de 350 km par recharge complète. Cette autonomie suffit amplement au circuit journalier. En effet, un Suisse moyen parcourt 38km par jour¹⁷.

Pour la recharge, l'installation d'une station de recharge à la maison est une nécessité car la prise domestique classique ne permet pas une recharge en dessous de 20 heures. Une prise de 11kW suffit amplement car elle assure un temps de recharge 5 heures. De plus, une station intelligente de recharge pourra entretenir la batterie et consommer uniquement durant les heures creuses.

La recharge rapide est en revanche limitée à 100kW par la batterie ce qui implique un temps de charge minimum de 30 minutes même en recharge ultra-rapide.

4.1.1.3. Justifications du choix

Les conducteurs moyens souhaitent avant tout une voiture au prix abordable avec une capacité suffisante pour une journée classique de conduite. Ils souhaitent ne pas avoir à se soucier de la disponibilité des bornes de recharge et simplement recharger leur voiture le soir. Considérant la moyenne suisse de km parcouru par habitant chaque jour qui est de 38km, une autonomie de 350 est largement suffisante. Elle apporte une marge confortable en cas de trajet plus longs, de charges plus lourdes ou d'une utilisation intensive du chauffage ou de la climatisation.

La faiblesse de ce modèle est qu'il ne permet pas une recharge rapide en dessous de 30 minutes. Cela implique certains inconforts durant de longs voyages comme un départ en vacances. La familiale ne pourra rouler que 2 à 3 heures avant de devoir s'arrêter pour une recharge de 30 minutes sur une borne adaptée (minimum 150kW). Cet inconfort reste cependant acceptable puisque qu'il se limite à des voyages inhabituels qui demandent déjà une certaine organisation. Intégrer ces pauses forcées dans le planning n'est pas une contrainte trop forte.

La limitation de la capacité et donc de la taille de la batterie permet une diminution du poids de la voiture, des coûts et de la place de stockage. Le modèle familial bénéficie donc d'un prix plus abordable.

4.1.2. La « vacancière »

4.1.2.1. Description

Le modèle « vacancière » s'adresse aux conducteurs qui doivent parcourir une grande distance journalière ou aux amateurs de modèle de luxe. Elle possède une haute capacité de batterie ce qui lui assure une autonomie élevée. Elle est cependant optimisée pour permettre une recharge ultra-rapide à 80% en 15 minutes.

La « vacancière » sera le modèle utilisé pour la conduite intensive ou de luxe. Il sera donc plus marginal dans le parc de voiture électrique du futur.

4.1.2.2. Caractéristiques et performances

Le modèle « vacancière » dispose d'une capacité de 100kWh pour obtenir une autonomie de 500 km. Ce modèle est optimisé pour les déplacements sur de grandes distances. Son autonomie reste équivalente à celle d'une voiture à essence dotée d'un petit réservoir. Cependant, sa puissance de recharge de 350kW lui permet de recharger sa batterie à 80% en 15 minutes sur une borne adaptée. (350kW).

Si la recharge rapide reste le modèle de recharge le plus efficace, la recharge lente au logement reste tout à fait possible. Une borne de 22kW est recommandée pour ce modèle car le temps de charge est seulement de 5 heures. Mais une borne de 11kW reste applicable.

Modèle	Capacité kWh	P_{Charge} kW	Efficacité kWh/100km	Autonomie km	Temps de charge			
					2.3kW	11kW	22kW	350kW (80%)
					heure		minute	
Vacancière	100	350	20	500	50	9	5	15

Tableau 7: Caractéristiques techniques voiture électrique modèle familiale.

4.1.2.3. Justifications du choix

Si la majorité des conducteurs vont rester dans la moyenne suisse de km parcourus, certains de par leurs métiers (taxi) ou leurs activités (véhicule de plaisance) nécessiteront un véhicule plus puissant que le modèle familial. Ce modèle permet des déplacements plus importants et surtout autorise la recharge ultra-rapide (15 minutes). La possession d'une autonomie « correcte » comparée à celle d'une voiture classique et l'assurance d'une recharge rapide soulage les craintes majeures des conducteurs hésitants.

Ce modèle sera en revanche plus cher que le modèle « familiale » de par sa capacité importante qui implique plus de batterie ainsi que par sa puissance de charge supérieure qui complexifie le développement de la batterie.

4.2. Prédiction sur l'évolution de la voiture électrique en Suisse

L'augmentation moyenne du nombre de voitures électriques a été d'environ 50 % durant les 7 dernières années. Pour se donner une idée de l'évolution future de cette nouvelle mobilité, plusieurs prévisions ont été faites avec différents pourcentages d'augmentation.

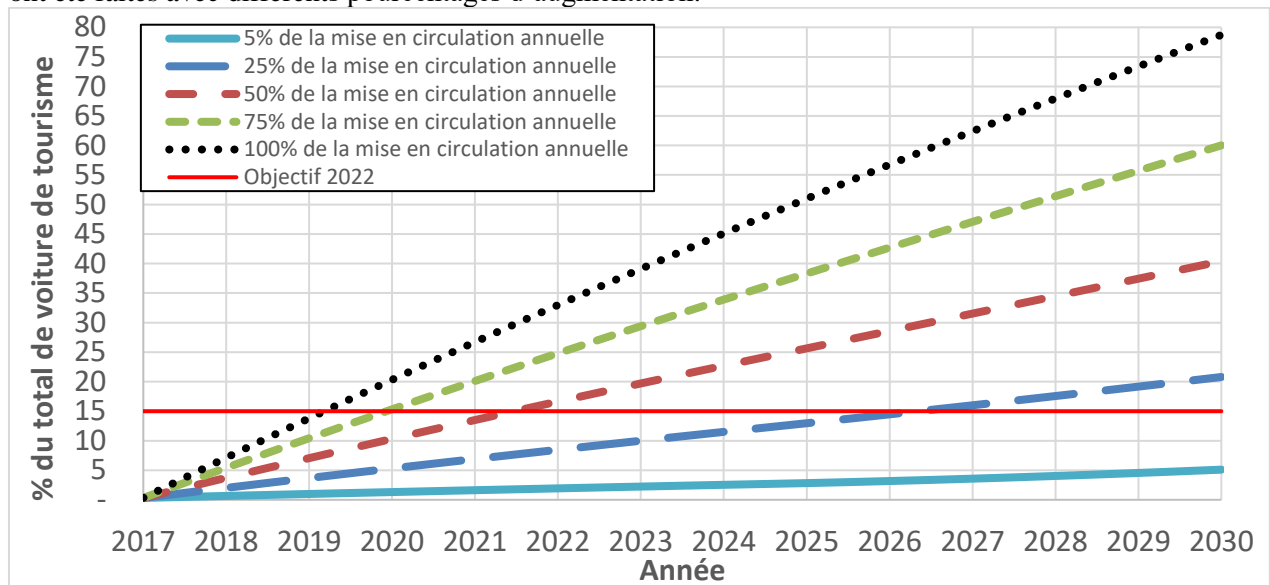


Figure 4: Evolution de la proportion de voiture électrique dans le parc routier selon leur part dans le total de mise en circulation annuelle

Ces prédictions sont faites selon un certain nombre d'hypothèses. L'augmentation annuelle du parc routier est fixée à 51'000 avec 315'000 nouvelles voitures ajoutées chaque année et 265'000 anciennes retirées de la circulation.

Il est constaté que même si 100% des nouvelles voitures mises en circulation sont des voitures électriques, la part électrique du parc routier dépassera à peine les 80% en 2030. Même avec un engagement total des consommateurs et de l'industrie, un remplacement complet des moteurs à explosion ne serait pas possible avant 2034.

Avec une part dans la mise en circulation de 1.2% en 2017, même si la tendance change et cette part augmente, la barre des 15% sera difficile à atteindre pour 2022.

4.3. Opinion de la collectivité sur la voiture électrique¹⁸

Depuis plusieurs années, la pensée écologique n'a pas cessé de prendre de l'importance dans la conscience collective. La voiture électrique étant associée à cette idée d'un futur plus vert a profité de cela pour se faire une image. Une thèse de doctorat de l'université de Lyon menée par Lénaïc Poupon a analysé l'étendue de cette pensée à travers divers tests.

4.3.1. Opinion à priori

L'étude a tout d'abord analysé les premiers mots qui viennent à l'esprit d'une personne non-conductrice de voiture électrique quand on lui présente le mot « automobile ». Le même test a ensuite été fait avec les mots « voiture électrique ».

Il en résulte que l'automobile est vue majoritairement positivement avec une forte association à la liberté de mouvement. Elle est cependant associée à des éléments négatifs comme « problèmes environnementaux », « le coût de l'énergie » et « risques d'accident ». L'automobile est donc vue comme un outil pratique mais avec un coût non-négligeable, financier ou environnemental. La vision écologique étant associée à un futur sain, l'automobile qui ne s'y conforme pas semble s'ancrer dans le passé. La voiture thermique est vue comme une étape parfaitement maîtrisée du développement de la mobilité mais une étape qu'il faudra tôt ou tard passer.

La voiture électrique est également vue comme un élément positif par la population. Les concepts positifs « pro-environnementale », « faibles coûts d'usage », « novatrice » et « bonnes conditions d'usage » lui sont associés. En revanche, elle est aussi associée à des éléments négatifs liés aux conditions spécifiques d'usage de la voiture électrique. Les concepts négatifs clés restent « l'autonomie », « la recharge », « citadine » et « le prix ». La voiture électrique est donc valorisée socialement mais condamnée pour ses performances vues comme inférieures.

La voiture électrique semble donc jouir d'une réputation plus positive que l'automobile dans la conscience collective. Cependant, les intentions d'achat restent peu nombreuses malgré ce bilan positif. Cela est dû au fait que les quelques éléments négatifs qui lui sont liés impactent l'utilité première d'un véhicule, les déplacements. La voiture reste avant tout un outil et les propriétaires ne sont pas enclin à payer plus pour un outil moins performant, aussi écologique soit-il.

En résumé, l'automobile est vue comme « performante au prix de conséquences » et la voiture électrique comme « avantageuses mais avec une utilité restreinte ».

4.3.2. *Opinion après usage*

L'étude révèle qu'après un test de conduite de quelques heures, l'opinion de la majorité des conducteurs tests a changé. Une grande partie des avis à priori concernaient les capacités techniques de la voiture électrique. Ses performances supérieures aux idées préconçues sont pour beaucoup dans ce changement d'opinion.

Au final, la voiture électrique est vue comme « une voiture normale » et cette normalité joue en sa faveur. Les voitures thermiques étant encore parfaitement fonctionnelles et satisfaisantes, le passage à la voiture électrique n'est motivé que par les valeurs personnelles des conducteurs. Si conduire l'une d'elle revient au final au même que de conduire une voiture thermique, les conducteurs ne verront aucune raison de craindre ou éviter ce changement.

Les tests ont également mis en évidence des différences favorables comme l'absence de bruit, la facilité de prise en main etc...

Thème principal	Favorable au VE	Défavorable au VE	Mitigée	Sous thématiques
Comparaison VE & VT (66 sujets)	47 sujets, soit 71,2%	0 sujets, soit 0%	16 sujets, soit 24,2%	La voiture électrique un véhicule « normal »
				Des différences dans la conduite favorables aux VE

Figure 5 : Résultats de la collecte d'opinion sur la comparaison entre voitures électriques et thermiques

4.3.3. *Conclusion*

La voiture électrique est vue comme une innovation prometteuse qui finira tôt ou tard majoritaire sur le marché. Cependant, les conducteurs assument que la technologie n'est pas encore mûre et que les limitations techniques du véhicule entraîneront des contraintes. En revanche ces opinions sont vite renversées après avoir testé un modèle. L'opinion publique n'accueille donc pas actuellement la voiture électrique les bras ouverts mais elle est certaine de le faire plus tard. Il va donc être nécessaire de se préparer à l'arrivée de cette mobilité électrique.

4.4. Impact sur la consommation électrique suisse¹⁹

Afin de déterminer l'impact sur la consommation électrique du pays que pourrais avoir une grande proportion de véhicules électriques, les hypothèses des modèles familiale et vacancière ont été utilisés.

Le tableau 8 montre que l'ajout des voitures électriques aura un impact réel sur la consommation suisse. Dans le cas souhaité par madame Doris Leuthard²⁰, un taux de 15% de VE implique 1.69% de consommation en plus ou moins de 1000GWh. Cependant, cette augmentation se passera sur un minimum de 4 ans et sera mitigée par les fluctuations classiques de la consommation. L'on passerait donc d'une augmentation de 1.1% enregistrée en 2017 à 1.63% d'augmentation avec ce taux de VE. Ce nouveau besoin énergétique aura donc un effet visible mais ce dernier se limiterait à ralentir la décroissance de la consommation énergétique suisse.

Pourcentage			Consommation		Résultats
Total	Familiale	Vacancière	Voitures	Suisse	Augmentation
			Gwh		%
1	1	0	64	58 500	0.11
5	5	0	320	58 500	0.55
10	9	1	667	58 500	1.14
15	14	1	987	58500	1.69
20	18	2	1 335	58 500	2.28
25	23	2	1 655	58 500	2.83
30	27	3	2 002	58 500	3.42
40	36	4	2 669	58 500	4.56
50	45	5	3 337	58 500	5.70
60	54	6	4 004	58 500	6.84
70	63	7	4 671	58 500	7.99
80	72	8	5 339	58 500	9.13
90	82	8	5 979	58 500	10.22
100	91	9	6 646	58 500	11.36

Tableau 8: Augmentation de la consommation électrique selon le pourcentage de voiture électrique. En surligné : Etat souhaité en 2022 par la présidente de la confédération Doris Leuthard.

5. Définition des scénarios envisageables

Afin d'analyser les effets de la mobilité électrique sur les réseaux, il est tout d'abord nécessaire de déterminer les environnements qui seront les plus touchés ainsi que les défauts susceptibles de subvenir.

Comme annoncé au point 1, l'influence de la mobilité électrique sur les réseaux électriques ne sera étudiée qu'en basse tension et se focalisera majoritairement sur la capacité des transformateurs MT/BT à supporter ces nouvelles charges. Les défauts tels que les surtensions et les surcharges des transformateurs HT/MT et tensions supérieures ne seront pas simulés.

5.1. Réseaux les plus touchés

Quartiers d'habitations de villages : Un des intérêts majeurs de la mobilité électrique est de pouvoir recharger son véhicule à domicile. L'utilisateur est ainsi libéré de l'obligation de s'arrêter périodiquement à une station-essence. Les tarifs électriques d'une maison impliquent également une recharge moins chère qu'avec une station de recharge publique.

Il en résulte que 90% des recharges sont faites à domicile ce qui va poser problème au réseau basse tension local. En effet, une maison chauffée au mazout ou tout autres moyens non-électriques possède des pics de puissance autour des 2kW. Les bornes de recharge lentes pouvant monter jusqu'à 22kW, la charge d'une maison pourrait se retrouver multipliée par 10. La capacité du réseau de quartier à supporter ces recharges doit donc être étudiée.

L'ajout d'énergie renouvelable comme les panneaux solaires est vu comme une piste pour contrer ces problèmes et cette solution doit aussi être évaluée.

Quartiers d'habitations de ville : Comme les quartiers de villages, ces quartiers devront supporter la majorité des recharges de voitures électriques. Cependant, les immeubles accueillent une plus grande démographie que des maisons individuelles. Il en résulte un plus grand nombre de véhicules qui généralement sont garés la nuit dans un parking avoisinant. Si ces voitures passaient à l'électrique, leurs nombres et concentrations impliqueraient des pics de puissance importants qui risqueraient de faire surcharger le transformateur local.

L'influence des bornes de recharge sera encore plus forte que dans les quartiers de villages. En effet, une grande partie des maisons individuelles sont équipées d'un boîtier de distribution limité à 20 ampères. Cette limitation empêche l'installation d'une borne 22kW qui serait de toute façon est souvent considérée excessive. En revanche, les parkings sont ouverts à tous et certains clients désirent laisser leurs véhicules sur place le moins de temps possible. Une borne de moins de 22kW n'est donc pas placée pour éviter un défaut de puissance dans le futur.

Il en résulte qu'un quartier de ville aura une plus grande concentration de voiture pour un même réseau avec des recharges consommant plus de puissance.

Centres commerciaux : Chaque centre commercial de taille moyenne ou supérieur est pourvu d'un parking pour accommoder sa clientèle. Si ces parkings commencent à installer des bornes de recharge en masse, cela va créer une charge très importante pour le transformateur local. En effet, les bornes installées seront toutes à 22kW et seront constamment utilisées. Les bornes des quartiers de villes ou de villages sont majoritairement sollicitées en fin de journée mais celles d'un centre commercial voient un flux variable mais continu de clients durant toute la journée.

La sécurité d'alimentation du centre commercial est également un élément extrêmement important à prendre en compte. Une coupure de courant prolongée dans un quartier n'est qu'une gêne passagère pour les habitants mais le même incident coûterait des millions à un commerce.

Quartier industriel : Les entreprises seront dans le futur enclines à remplacer leurs parcs de véhicules par des variantes électriques. De plus, un parking avec recharge sera sûrement mis à disposition des employés tôt ou tard. Une station de bornes de recharge lentes sera un poids pour le transformateur local et la charge devra être gérée en conséquence.

Stations-service : Les propriétaires de ces stations souhaiteront passer à la mobilité électrique pour endiguer la perte de client constante qu'entraînera l'avènement de la mobilité électrique. Ces stations se focaliseront sur les recharges ultra-rapides pour faciliter la circulation des clients. Cependant, les hautes puissances demandées seront problématiques pour le réseau local. Sa capacité à supporter de telles charges doit être évaluée.

Parkings et bornes sauvages : Les parkings publics sont une nécessité pour les conducteurs qui ne possède pas de place de parking privée. Si ces conducteurs passent au véhicule électrique, ils ne pourront pas recharger leurs voitures ailleurs qu'aux stations-service. Les parkings publics pourraient être à terme équipés de bornes de recharge pour contrer cela. Cependant, ces espaces communs ne consommaient jusque-là de l'électricité uniquement pour les éclairages. L'ajout d'un grand nombre de bornes de recharge va peser sur les transformateurs à proximité. Ce cas étant identique à celui d'un quartier de ville moins l'immeuble, il ne sera pas traité.

L'implémentation de borne de recharge rapide (50kW) a plusieurs endroits clés d'une agglomération ne posera pas de charge problématique. En effet, les transformateurs de villes sont tous exploités à 30% de leurs capacités de puissance ou moins en permanence. L'ajout d'une borne représente une augmentation de 8% au plus haut et ne posera donc pas de problèmes.

5.2. Scénarios

Trois scénarios différents vont être considérés. Chacun va observer les changements apportés par la mobilité électrique aux différents réseaux décrits au point 5.1.

Scénario	1	2	3
Part des voitures électriques dans le parc routier	15%	50%	100%

Tableau 9 Scénarios considérés

Le scénario 1 se focalise sur une proportion de voitures électriques atteignable au moyen terme. En effet, si la part de l'électrique dans les nouvelles voitures mises en circulation passe de 1.21 à 20%, ce scénario sera atteint en 2030. Il est donc intéressant d'analyser les conséquences de ce changement très probable.

Le scénario 2 envisage une situation qui arrivera sur le long terme car une telle proportion de voitures électriques ne sera pas en circulation avant plusieurs décennies. Cependant, cette situation finira par se présenter aussi faut-il l'analyser.

Le scénario 3 est volontairement irréaliste avec une proportion de voitures électriques de 100%. Ce « pire cas possible » est envisagé pour tester la robustesse des réseaux touchés ainsi que le pire impact possible qu'il leur infligerait.

5.3. Solutions applicables

Afin de contrebalancer des appels de puissance trop importants dus à la mobilité électrique, seulement un certain nombre de solutions sont prises en compte.

Gestion intelligente de la consommation : Afin d'éviter des pics de puissance, les charges sont pilotées par une intelligence en local ou à distance, par exemple avec un EMS (Energy System Management). Il s'agit d'un automate programmé pour exécuter une régulation adéquate des charges, productions et capacités de stockage énergétique. Cette solution s'avère très efficace surtout aux heures de pointes mais son implémentation peut être difficile, surtout dans un cas comme la mobilité électrique qui implique plusieurs partis privés.

Introduction d'une production énergétique : Une source énergétique renouvelable peut être ajoutée à côté de des nouvelles charges pour compenser la surconsommation. Dans notre cas, ces productions prennent majoritairement la forme de centrales photovoltaïques de tailles variables. Les éoliennes étant difficiles à implémenter en zones habitées et le potentiel hydraulique suisse étant déjà largement exploité, le photovoltaïque est la solution la plus facile à instaurer quelle que soit la taille de la centrale. Mais le revers de cette production photovoltaïque est qu'elle est imprévisible, inconsistante et très rarement synchronisée avec la consommation. Le cas impliquant la présence d'une batterie dans l'habitation pour faciliter l'autoconsommation n'a pas été simulé car la solution de l'introduction d'un système de stockage énergétique est une variation grande échelle de ce cas.

Introduction d'un système de stockage énergétique : Un système de stockage est installé pour contrebalancer les pics de puissance. Le système est dimensionné sur mesure pour la fonction mais il peut également être utilisé pour faire du réglage primaire s'il est de taille suffisante. En effet, les cas problématiques qui justifient l'installation d'un tel système sont rares et souvent aux heures de pointe. Les heures creuses peuvent donc être utilisées pour faire du réglage et ainsi aider à payer le système de stockage. Cependant, cette solution reste chère à introduire et dans le cas d'un système de grande taille (batterie de quartier), la question « qui paye? » est problématique. De plus, selon la technologie utilisée, la durée de vie du système de stockage énergétique varie grandement tout comme les conséquences environnementales.

Renforcer le réseau : Le transformateur de la ligne est jugé comme sous-dimensionné et il est remplacé par un nouveau plus important. Il s'agissait de la solution par défaut dans le passé dû à sa simplicité de concept, son efficacité et le fait qu'il suffisait aux GRD d'envoyer la facture à Swissgrid. Cependant, les nouvelles réglementations imposent que cette solution soit un dernier recours.

Chaque solution possède des avantages et des défauts aussi leur implémentation sera discutée dans chaque cas de chaque scénario. Le renforcement du réseau et l'ajout d'un système de stockage énergétique ne seront en revanche pas simulés car leurs efficacités est prouvée. Seules la justification de leur implémentation sera remise en cause.

6.1.2. Simulation sans VE

Le quartier décrit en 7.1.1 a été simulé sur une période de 1 an afin d'étudier les variations de la consommation et la marge de puissance à disposition du quartier.

6.1.2.1. Résultats

Une simulation sur 1 an a été faite afin d'étudier l'influence des saisons et surtout isoler la période la plus critique de l'année pour ce quartier. Celle-ci se situe en hiver, sans doute à cause du plus important besoin de chauffage.

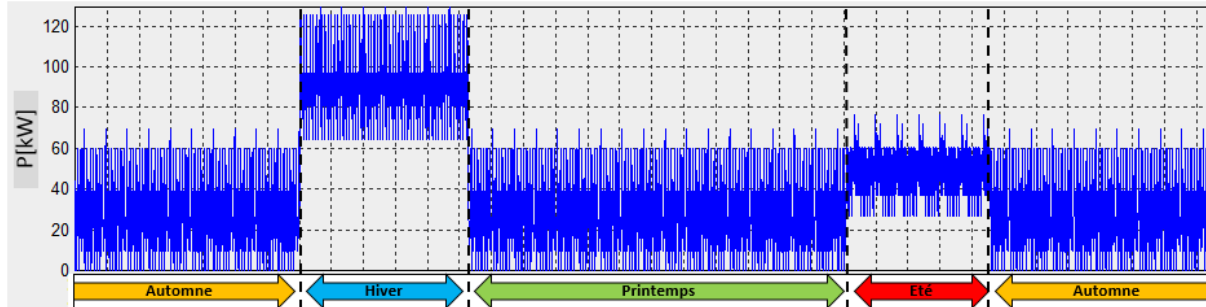


Figure 7: Simulation sur 1 an du modèle de quartier sans VE. $P_{max} = 130kW$

Une semaine type d'hiver révèle des pics aux heures d'activités classiques comme le matin, le midi et le soir. Les week-ends montrent une consommation plus forte sans doute due à la présence en continu des habitants.

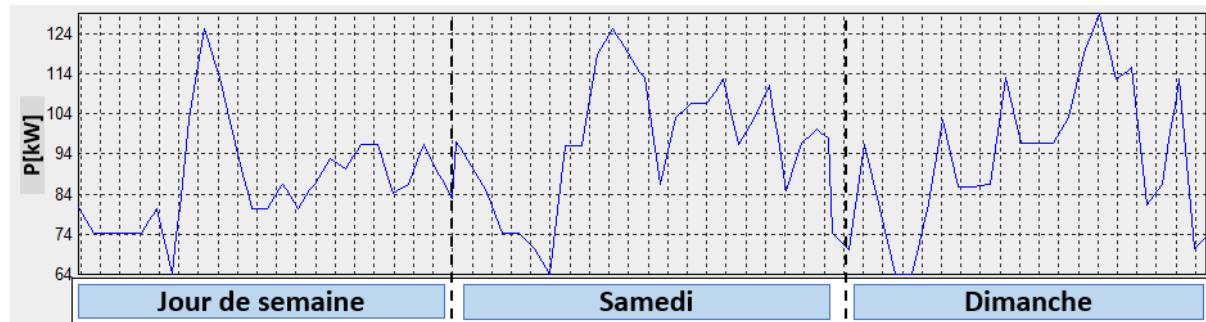


Figure 8: Simulation sur 1 semaine d'hiver du modèle de quartier sans VE. $P_{max} = 130kW$

6.1.2.2. Discussion

Les saisons sont facilement discernables et correspondent bien à un profil d'habitation avec une moyenne élevée en hiver pour compenser la température et plus faible en été.

Le pic maximal de puissance de 130kW révèle cependant un détail très important, le réseau est largement surdimensionné. Comme cité précédemment, ce quartier possède un transformateur limité à 630kVA. La charge maximale représente donc moins de 21% de la puissance limite. Une telle marge est surprenante car même si les GRD surdimensionnent exprès le réseau pour accommoder de futures charges, une telle différence reste anormale.

Cet excès peut s'expliquer par le type de chauffage des habitations. Si les 630kVA étaient répartis équitablement parmi les 50 maisons, chacune pourrait consommer jusqu'à 12.6kVA ce qui correspond à la consommation pic d'une habitation avec un chauffage électrique. Il est possible que lorsque le réseau a été proportionné, le GRD voulait qu'il soit capable de résister à une majorité de chauffages à l'électrique. Ce type de chauffage était peut-être jugé novateur et enclin à remplacer le mazout, poussant le GRD à vouloir s'éviter des problèmes par la suite.

Qu'elle que soit la raison de ce surdimensionnement, il reste un avantage pour l'implémentation de la mobilité électrique.

6.1.3. Simulation avec 15% de VE

Ce scénario est le plus susceptible de se réaliser à court ou moyen terme dépendant l'application de la politique énergétique du pays. Pour le quartier modèle, ces 15% correspondent à 8 voitures électriques accompagnées par une borne de recharge de 11kW.

6.1.3.1. Résultats

Les voitures électriques étant utilisées toutes l'année peu importe la saison, leur addition ne change pas le fait que l'hiver reste la saison qui demande le plus d'énergie.

L'ajout des recharges est clairement reconnaissable avec un pic massif de puissance en début de soirée. Il est à noter qu'avec seulement 15% de voitures électriques, le pic de puissance est monté de 70%.

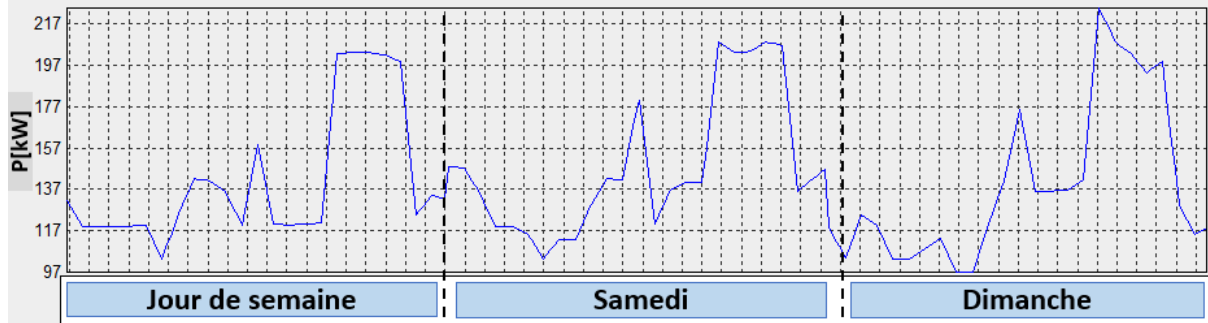


Figure 9: Simulation sur 1 semaine d'hiver du modèle de quartier avec 15% de VE, recharges synchronisées. $P_{max} = 220kW$

6.1.3.2. Solutions possibles

6.1.3.2.1. Gestion intelligente de la consommation

La gestion intelligente est difficilement applicable à un quartier. En effet, chaque propriétaire de voiture électrique est un privé qui est libre de recharger son véhicule quand il le souhaite. La plupart refuseraient de se voir limités ou encadrés. De plus, l'implémentation d'un système capable de gérer les bornes d'un quartier tout entier nécessiterait la pose de câbles intranet entre chaque maison ou d'autres complications similaires.

Cependant, si un EMS serait difficile à mettre en place, son efficacité est prouvée. Les pics de consommations augmentent de 16kW ou 13%. Toute complication est supprimée par l'efficacité de la régulation et les pics exceptionnels qui pourraient subvenir impliqueraient une réponse adéquate de l'EMS, évitant ainsi de mettre en danger le transformateur.

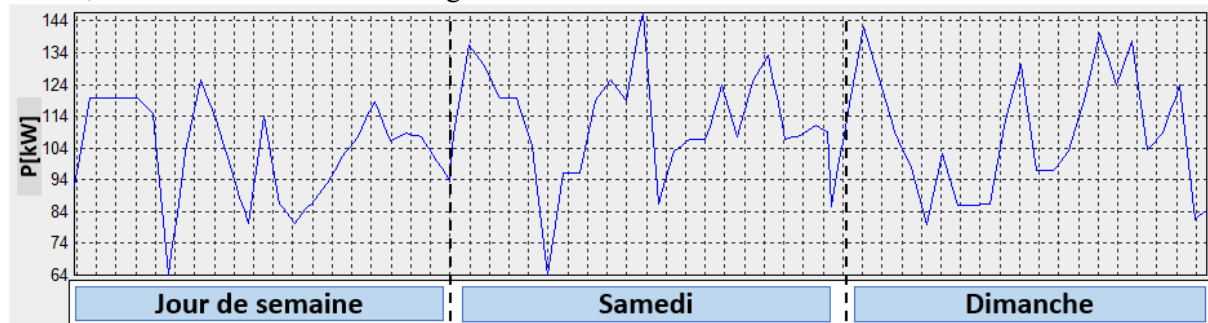


Figure 10: Simulation 1 semaine d'hiver du modèle de quartier avec 15% de VE, recharges gérées par EMS. $P_{max} = 146kW$

6.1.3.2.2. Introduction d'une production énergétique

Cette solution s'avère en revanche inefficace du fait que les heures de production ne croisent que très peu les heures de consommations. Les pics de milieu de journées sont largement supprimés mais ceux de fin de soirée restent inchangés.

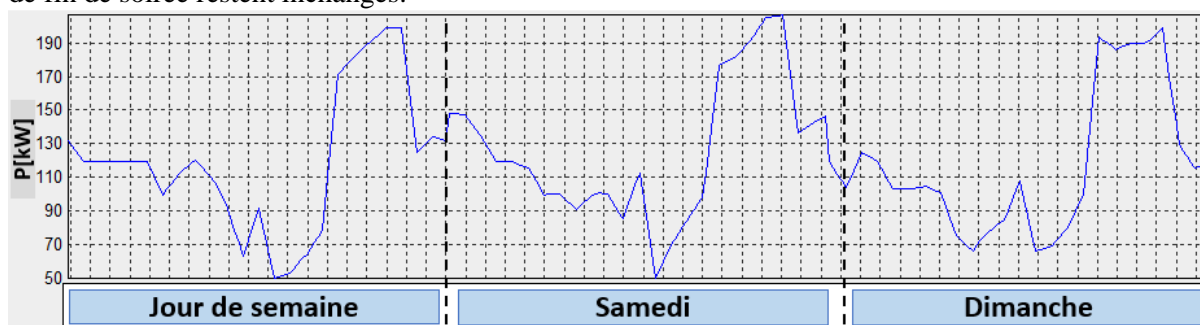


Figure 11: Simulation sur 1 semaine d'hiver du modèle de quartier avec 15% de VE et de PV, recharges synchronisées. $P_{max} = 205W$

6.1.3.3. Discussion

La consommation du quartier est montée à 220kW avec des pics qui s'étalent sur plusieurs heures. Cependant, ces valeurs restent largement dans les limites du transformateur de quartier. Le surdimensionnement du réseau compense l'augmentation de la consommation tout en gardant une marge de 65%. L'introduction des voitures électriques ne demande donc pas d'interventions supplémentaires.

Cet état de fait n'est en revanche pas garanti au long terme car la faible consommation électrique originale du quartier est due notamment aux chauffages non-électriques encore majoritaires. La popularité des PAC implique que ces chauffages nécessiteront une alimentation électrique qui se rajoutera aux charges déjà présentes. Cette augmentation impliquerait au pire un ajout de 72kW qui monterait le pic de consommation à 292kW ou 46% de la puissance disponible. Des conditions extrêmes pourraient entraîner des besoins énergétiques imprévus et menacer la sécurité du transformateur mais ces conditions restent exceptionnelles et la ligne est considéré comme solide.

6.1.4. Simulation avec 50% de VE

Ce scénario plus extrême est plausible sur le long terme. Il implique que 25 habitants du quartier modèle possèdent une voiture électrique dont 1 qui possède un modèle plus puissant demandant une borne 22kW.

6.1.4.1. Résultats

Les pics de puissance induits par les recharges sont à présent évident sur le graphique en figure 12. Une disproportion importante relève les pics de puissance des 220kW précédents au 425kW actuels. Ces consommations restent en dessous des 630kVA limites mais elles correspondent à 67% de la puissance disponible. La marge de puissance reste acceptable, cependant, des sécurités devraient être installées pour contrebalancer un pic exceptionnel de puissance éventuel (un jour de fête en hiver par exemple).

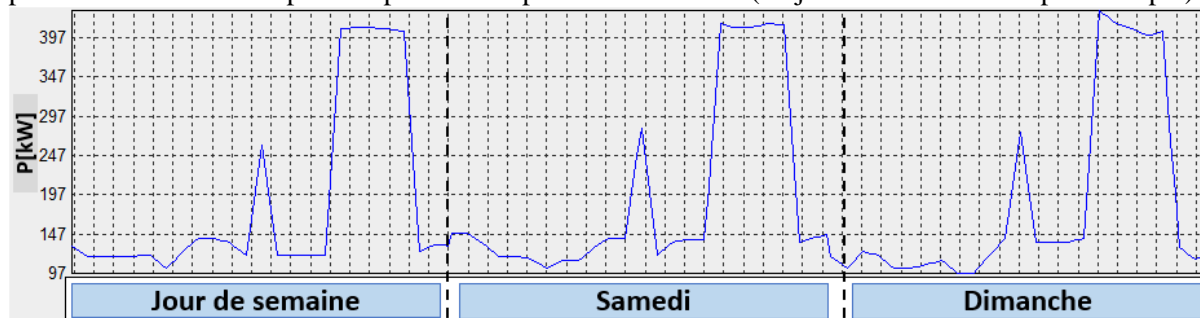


Figure 12: Simulation semaine d'hiver du modèle de quartier avec 50% de VE, recharges synchronisées. $P_{max} = 425kW$

6.1.4.2. Solutions possibles

6.1.4.2.1. Gestion intelligente de la consommation

La gestion via EMS s'avère à nouveau efficace avec une réduction de 30% des pics de puissances. Mais comme cité précédemment, l'implémentation d'un tel système serait difficile.

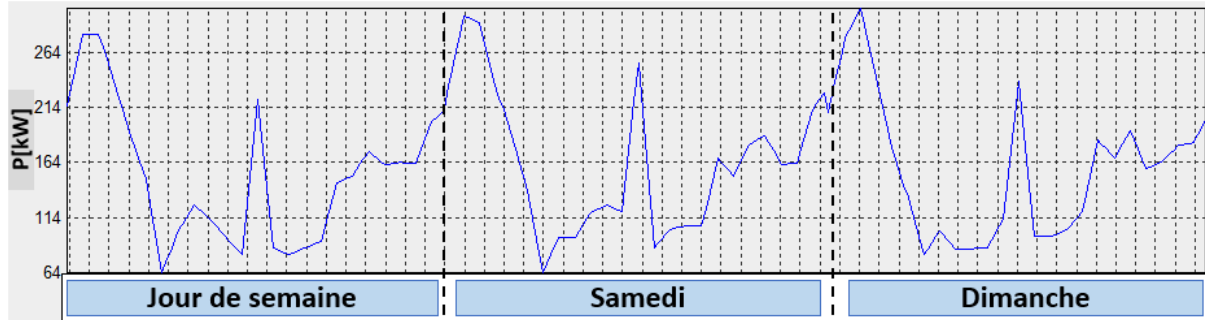


Figure 13: Simulation semaine d'hiver du modèle de quartier avec 50% de VE, recharges gérées par EMS. $P_{max} = 300kW$

6.1.4.2.2. Introduction d'une production énergétique

L'ajout d'une source de production reste inefficace. Les pics de puissance situés en fin de journée restent inchangés et ce sont les plus importants. Une surproduction commence en revanche à apparaître en milieu de journée et pourrait se montrer problématique si elle augmente.

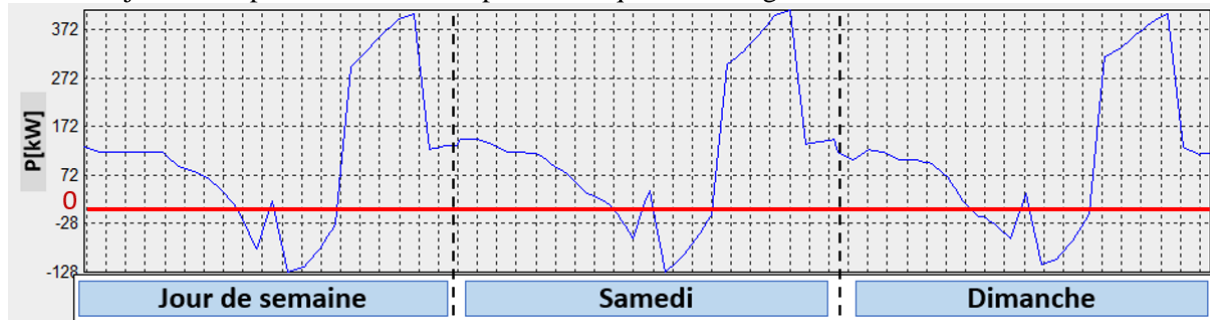


Figure 14: Simulation semaine d'hiver du modèle de quartier avec 50% de VE et de PV, recharges synchronisées. $P_{max} = 410kW$

6.1.4.3. Discussion

Avec 50% de voitures électriques, le transformateur de quartier perd une bonne partie de sa marge mais reste largement dans les limites de sécurité. Les pics de puissances montant jusqu'à 425kVA, il devient tout de même nécessaire de prévoir des sécurités car un aléa énergétique pourrait entraîner une surconsommation problématique. Mais à ce niveau-là, un simple accord entre voisins sur qui charge sa voiture à quelle heure suffirait à résoudre le problème. Le réseau est donc jugé comme stable.

6.1.5. Simulation avec 100% de VE

Il s'agit du scénario extrême qui ne se réalisera sans doute pas avant la fin du siècle simplement de par l'attachement des conducteurs à la voiture thermique qu'ils ne voudront pas voir complètement disparaître. Ce scénario implique 47 bornes de recharge 11kW et 3 bornes 22kW.

6.1.5.1. Résultats

La limite du transformateur est dépassée de 13%. En sachant qu'un 20% de marge doit être gardé par sécurité, le dépassement est donc de 211kW. Une solution doit donc être introduite ici car le réseau est jugé comme surchargé.

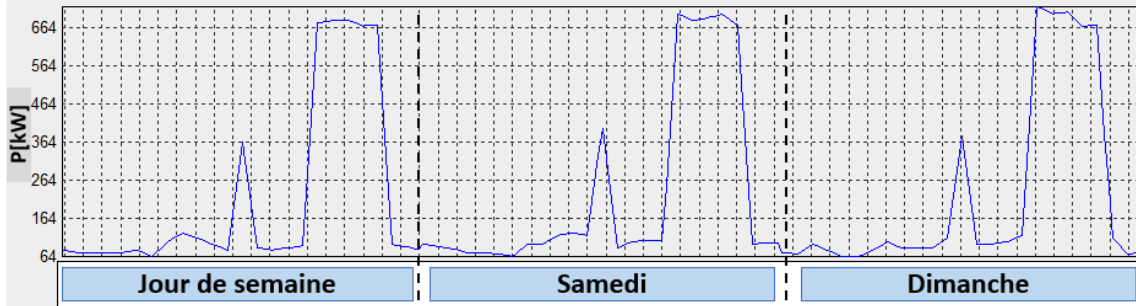


Figure 15: Simulation semaine d'hiver du modèle de quartier avec 100% de VE, recharges synchronisées. $P_{max} = 715kW$

6.1.5.2. Solutions possibles

6.1.5.2.1. Gestion intelligente de la consommation

L'EMS se montre encore plus efficace à 100% de voitures électriques qu'à 50%. Les pics redescendent à 470kW ou une diminution de 34%. Cela suffirait à faire rentrer la consommation dans les limites de sécurité du transformateur tout en gardant une marge de 25%. De plus, l'EMS peut être programmé avec des sécurités qui coupent les recharges en cas de surconsommation pour éviter tous problèmes sur le transformateur. Par conséquent, cette solution est applicable.

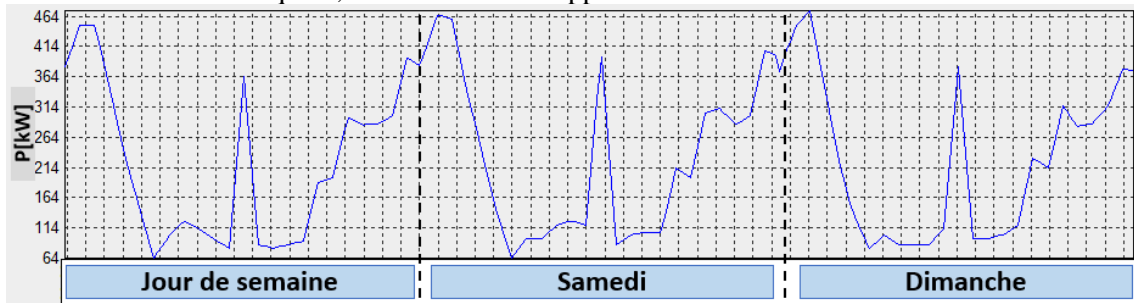


Figure 16: Simulation semaine d'hiver du modèle de quartier avec 100% de VE, recharges gérées par EMS. $P_{max} = 470kW$

6.1.5.2.2. Introduction d'une production énergétique

L'ajout de centrales photovoltaïques ne fait qu'empirer la situation. En effet, les pics de puissances de fin de journée restent inchangés et la surproduction de midi peut atteindre jusqu'à 360kW. Cet ajout de puissance est dangereux car il risque de provoquer des surtensions. De plus, la nature imprévisible de la production solaire fait que le GRD ne peut pas anticiper avec précision cette production. S'il envoie suffisamment de puissance pour combler le creux de midi et que la production solaire s'y ajoute, le transformateur risque de surcharger.

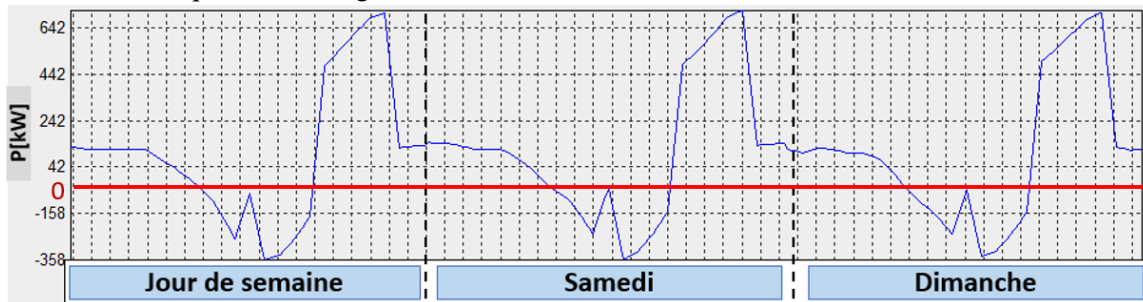


Figure 17: Simulation semaine d'hiver du modèle de quartier avec 100% de VE et de PV, recharges synchronisées. $P_{max} = 700kW$, $P_{min} = -360kW$.

6.1.5.2.3. Système de stockage énergétique et renforcement du réseau

L'ajout d'un système de stockage serait efficace ici pour aider à compenser les pics de fin de journée. Une batterie avec 200kW de puissance et 1MW de capacité par exemple suffirait à résoudre le problème. Il est cependant mal avisé d'investir autant pour l'achat, la mise en place, la gestion et l'entretien d'un tel dispositif lorsqu'un minimum de régulation régler le problème.

Le renforcement de réseau n'est pas applicable ici car des alternatives « smart » moins chères sont disponibles.

6.1.5.3. Discussion

Le scénario extrême montre les limites du réseau électrique d'un quartier d'habitation de village. Le surdimensionnement permettrait jusque-là de contrebalancer les recharges électriques mais 50% de voitures électriques s'avère être la limite avant d'agir. Le réseau étant dimensionné pour permettre à chaque maison de consommer jusqu'à 10kW en même temps sans risque, même une maison chauffée au mazout dépasse cette limite dès qu'elle recharge sa voiture. La situation ne fera qu'empirer avec la disparition du mazout et l'avènement des PAC.

Une solution doit donc être implémentée. La gestion intelligente a prouvé son efficacité mais elle est très difficile à implémenter dans un quartier de village. 50 privés différents devraient se mettre d'accord sur un système d'exploitation unique et payer pour le mettre en place. Ce système devrait gérer en plus des bornes de recharges de technologies et de fabricants pas forcément identiques ce qui complexifie encore le problème.

Une batterie de quartier aurait ici un bon potentiel. Elle contrebalancerait les pics aux heures de pointe, pourrait stocker le surplus solaire et ainsi booster l'autoconsommation. Les habitants apprécieraient également cette solution car ils restent libres de toutes restrictions de consommation et leurs installations photovoltaïques deviennent plus rentables. Cependant, une telle batterie coûterait aux alentours de 500'000CHF. - sans prendre en compte l'entretien et la durée de vie limitée de l'installation.

6.2. Quartiers d'habitations de ville

6.2.1. Données de simulation et hypothèses

Pour simuler correctement la consommation un quartier résidentiel de ville, un quartier composé de 2 immeubles a été défini. Ces immeubles comportent 52 appartements chacun et sont chauffés par un système de pompe à chaleur (PAC). Un parking privé de 100 places est adjacent aux immeubles. Le réseau électrique qui relie ces immeubles et le parking est alimenté par un transformateur 630kVA et les sections de câbles varient entre 100 et 25 mm².

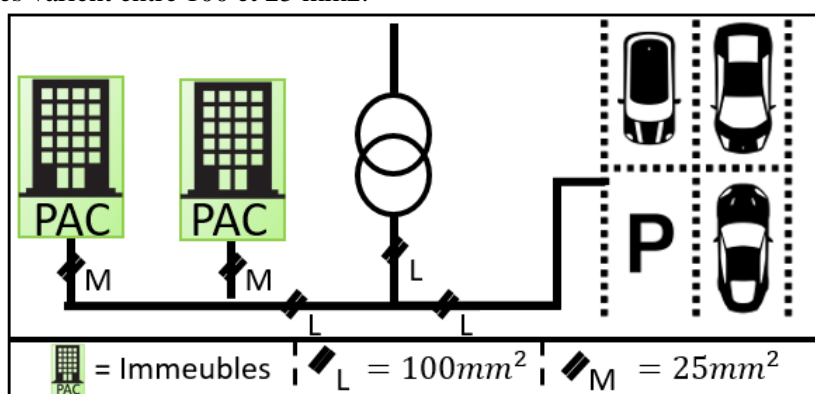


Figure 18: Schéma du modèle de quartier de ville avec 2 immeubles chauffés par PAC pour un total de 104 appartements reliés à un parking privé de 100 places.

La consommation des immeubles a été déduite à partir de courbes de charge fournies par un GRD local (voir annexe 3). Elle peut monter jusqu'à 100kW et varie selon les saisons.

Afin de simuler l'influence des recharges dans ce modèle, les hypothèses suivantes ont été faites :

- ❖ Les 2 immeubles et le parking sont reliés à un transformateur de 630kVA
- ❖ Chaque voiture électrique est assumée complètement vidée en fin de journée et nécessite 5 heures complètes de recharge avec une borne 11kW et 3 heures avec une borne 22kW. Il en va de même le week-end.
- ❖ Afin de simuler le cas le plus défavorable, tous les conducteurs chargent leurs voitures électriques le soir à la même heure.
- ❖ Les bornes de recharge installées dans le parking sont d'office des 22kW.
- ❖ Les heures de recharges synchronisées sont les suivantes : 12h00 et de 17h00 à 22h00
- ❖ Le potentiel photovoltaïque des immeubles a été ignoré de par le rapport disproportionné entre la surface de production disponible et la consommation de l'immeuble.
- ❖ Le prix d'une batterie est estimé à 500CHF. - le kWh et le renforcement à 150'000 CHF. - le MW + 400CHF. - le mètre de câble.

6.2.2. Simulation sans VE

Le quartier décrit en 7.2.1 a été simulé sur une période de 1 an afin d'étudier les variations de la consommation et la marge de puissance à disposition du quartier.

Cette simulation a été faite afin d'étudier l'influence des saisons et surtout isoler la période la plus critique de l'année pour ce quartier. Celle-ci semble se situer en automne, peut-être parce que le taux d'occupation des appartements est plus élevé. Le système de chauffage utilisé étant une PAC, son influence sur la consommation électrique est plus faible. Le chauffage étant la raison majeure de la haute consommation en hiver, une dépense moins élevée dans ce cas est normale. Quelle que soit la raison, il s'agit de ces pics de consommation que le dimensionnement du réseau doit prendre en compte.

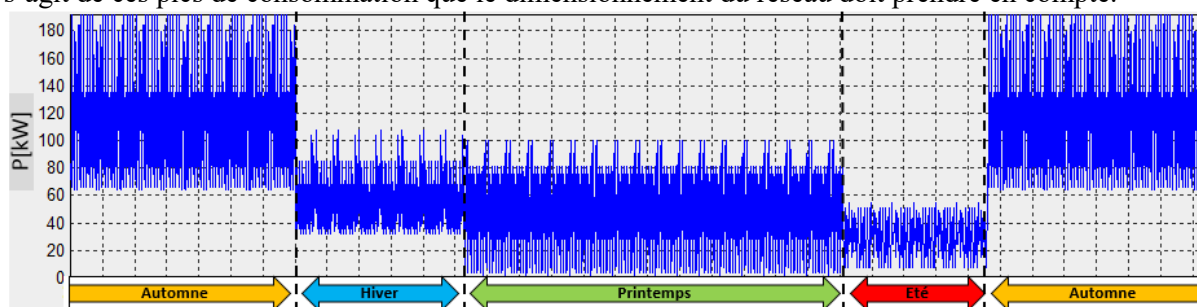


Figure 19: Simulation sur 1 an du modèle de quartier de ville sans VE. $P_{max} = 190kW$

Une simulation des jours de semaine met en évidence des pics entre 6 et 10 heures ainsi qu'à 17 et 19 heures. Ces heures sont généralement celles auxquelles les résidents sont les plus actifs. Les pics de midi ne sont pas présents sans doute parce qu'une partie des locataires ne mangent pas sur place.

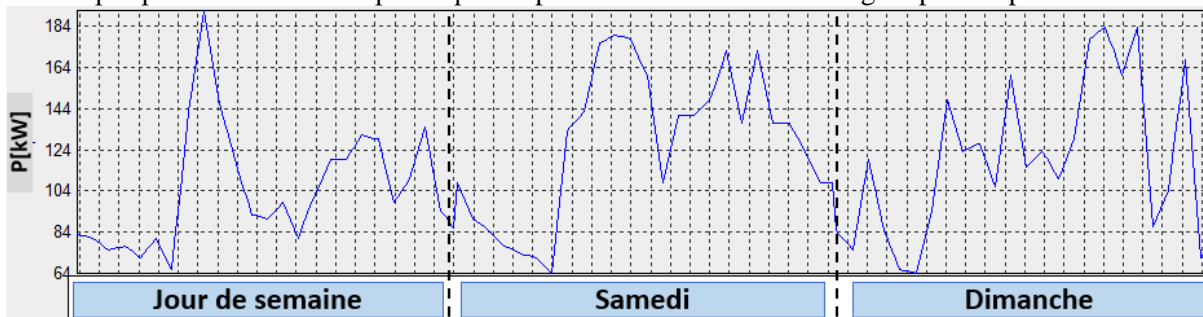


Figure 20: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville sans VE. $P_{max} = 190kW$

Comme pour les quartiers de villages, le réseau est surdimensionné pour éviter des surcharges du transformateur en cas de pics de consommation et afin d'accommoder d'éventuels rajouts sur le réseau. La marge de puissance à disposition ici est de 440kW ou 70%. Cependant, la densité de population est 2 fois supérieure à celle d'un quartier de village ce qui implique une plus forte concentration de voiture qui si elles passent à l'électrique nécessiteront davantage de puissance.

6.2.3. Simulation avec 15% de VE

Ce scénario réaliste à court terme implique deux immeubles et un parking équipé de 15 bornes de recharge à 22kW.

6.2.3.1. Résultats

L'ajout des recharges lentes est flagrant avec une consommation électrique centrée sur la soirée alors que précédemment, la matinée était l'heure de pointe la plus notable. Les pics de puissance passent de 190kW à 520kW et la marge de puissance est réduite à 17% ce qui est trop faible pour assurer un tampon acceptable en cas d'aléas énergétiques. Des sécurités ou des mesures pour réguler la consommation doivent donc être prises.

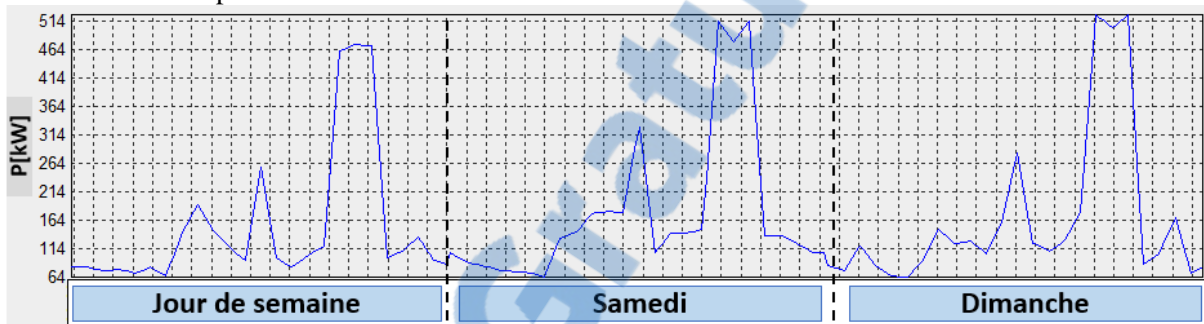


Figure 21: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville avec 15% de VE, recharges synchronisées.
 $P_{max} = 520kW$

6.2.3.2. Solutions possibles

6.2.3.2.1. Gestion intelligente de la consommation

L'implémentation d'un système de gestion énergétique (EMS) dans le parking permettrait de réguler les recharges et assurer autant le confort des utilisateurs que la sécurité du réseau. L'installation de ce système est nettement moins complexe dans ce contexte car les bornes de recharge sont toutes du même modèle et sont installées au même endroit par le même monteur. Un contrat spécial peut même être passé avec le GRD local pour faciliter les transactions.

L'EMS réduit les pics de consommation à 250kW, soit une baisse de 50% comparé aux recharges synchronisées. La marge de puissance est alors de 60% ce qui confirme la stabilité du réseau.

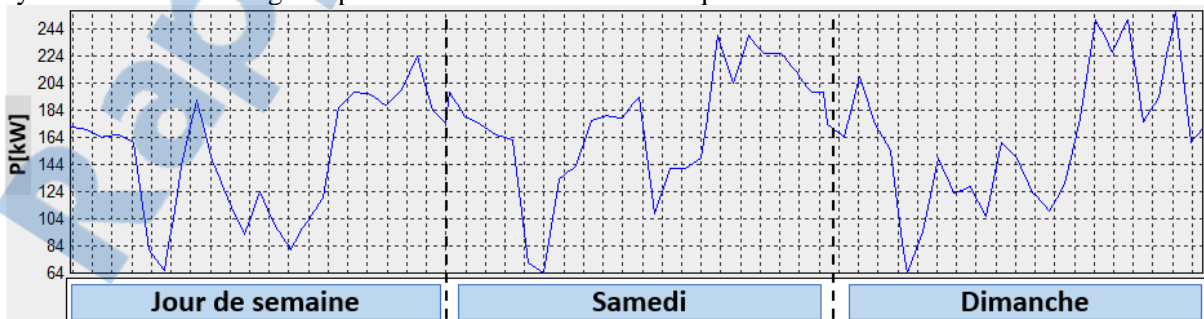


Figure 22: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville avec 15% de VE, recharges gérées par EMS.
 $P_{max} = 250kW$

6.2.3.3. Discussion

La plus forte concentration de population se fait sentir dans ce modèle. En effet, l'ajout de 15 voitures électriques rechargées durant 3 heures à 22kW implique un ajout de 330kW à heures plus ou moins fixes. Malgré cet ajout, la courbe de consommation reste dans les limites tolérées mais une solution doit être implémentée pour compenser la marge de puissance devenue insuffisante. L'installation d'un EMS est la solution la plus prometteuse de par sa facilité d'implémentation dans ce contexte et son efficacité. Un système de contrôle complet n'est même pas encore nécessaire à ce niveau-là, une simple régulation propre à chaque borne suffirait à éviter le pire des pics mais un EMS complet serait prêt pour l'ajout de nouvelles bornes.

6.2.4. Simulation avec 50% de VE

Ce scénario plausible au moyen terme prend en compte un parking équipé de 50 bornes de recharge à 22kW.

6.2.4.1. Résultats

L'influence des recharges de voitures électriques est devenue l'élément déterminant de la courbe de charge du quartier. Les pics de puissance valent plus que le double de la limite du transformateur. De plus, ces pics sont journaliers et s'étendent sur 3 heures. Le transformateur local n'est pas dimensionné pour une telle charge.

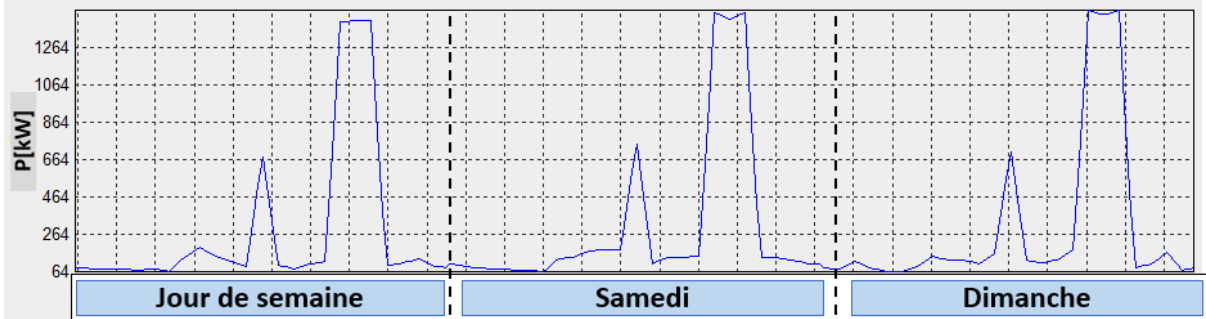


Figure 23: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville, avec 50% de VE et PV, recharges synchronisées.
 $P_{max} = 1.45MW$

6.2.4.2. Solutions possibles

6.2.4.2.1. Gestion intelligente de la consommation

L'EMS permet de baisser les pics de puissances à 600kW soit une baisse de 60%. Malgré cette réduction, la courbe de charge du quartier passe trop près de la limite du transformateur pour que le réseau soit considéré stable. Des mesures supplémentaires doivent être prises pour assurer une marge de sécurité minimum de 20%.

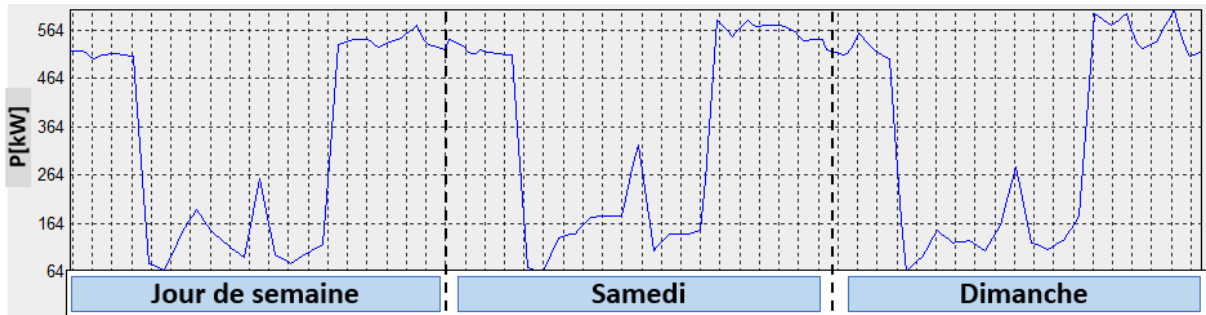


Figure 24: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville avec 50% de VE, recharges gérées par un EMS.
 $P_{max} = 600kW$

6.2.4.2.2. Système de stockage énergétique et renforcement du réseau

L'ajout d'un système de stockage énergétique permettrait efficacement de couper les pics de consommation durant le gros des recharges en début de soirée. Cela nécessiterait cependant un système doté d'une capacité avoisinant les 3MWh pour que le système redescende dans les limites du transformateur tout en gardant une marge acceptable.

6.2.4.3. Discussion

Les recharges de voitures électriques sont devenues les consommateurs principaux du réseau au niveau de la puissance. L'ajout de 50 voitures électriques appelle donc des mesures pour assurer la sécurité du réseau. L'implémentation d'un EMS couplé à une batterie d'une capacité de 200kWh réglerait le problème tout en assurant une consommation intelligente et le confort des utilisateurs pour un coût estimé de 100'000 CHF.-.

Un système de stockage plus important résoudrait également le problème mais son coût est bien trop élevé comparé à celui de l'EMS pour être justifiable. Un tel système est estimé à 1.5 million de CHF. - et un renforcement de 1MW du réseau coûterait entre 200'000 et 300'000 CHF.-. L'EMS couplé à une batterie reste donc le choix optimal.

6.2.5. Simulation avec 100% de VE

Ce scénario extrême implique que 100 borne de recharge à 22kW sont exploitées côte à côte et ce entre 3 et 4 heures par jour.

6.2.5.1. Résultats

L'augmentation de la consommation de puissance due aux bornes de recharges est telle que la courbe de charge d'origine des immeubles est presque devenue négligeable. Les pics de puissances montent à 2.52MW soit 4 fois plus que la limite du transformateur d'origine. Le réseau n'est pas stable et doit être modifié.

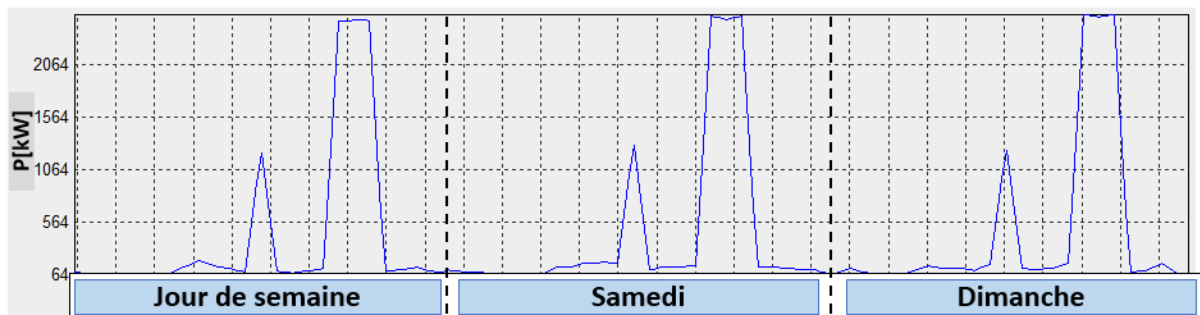


Figure 25: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville avec 100% de VE et de PV, recharges synchronisées.
 $P_{max} = 2.52MW$

6.2.5.2. Solutions possibles

6.2.5.2.1. Gestion intelligente de la consommation

L'EMS permet de réduire drastiquement les pics de puissance en espaçant les recharges. Il les réduit à 800kW pic soit une baisse de presque 70%. Cependant, cette baisse se paye par une consommation d'au moins 650kW entre 17:00 et 04:00.

Malgré l'efficacité de l'EMS, la limite de puissance du transformateur est toujours dépassée. Une solution complémentaire ou alternative doit donc être trouvée.

6.2.5.2.2. Système de stockage énergétique

L'implémentation d'un système de stockage énergétique qui complèterait l'EMS discuté au point précédent réglerait le problème et sécuriserait le réseau. Une difficulté en revanche repose dans la capacité à fournir. Le système de stockage devrait fournir un minimum de 300kW durant 12 heures pleines soit une capacité de 3.6MWh.

Un système de stockage énergétique sans un EMS pour différer la charge nécessiterait une puissance de 3MW et une capacité de 9MW.

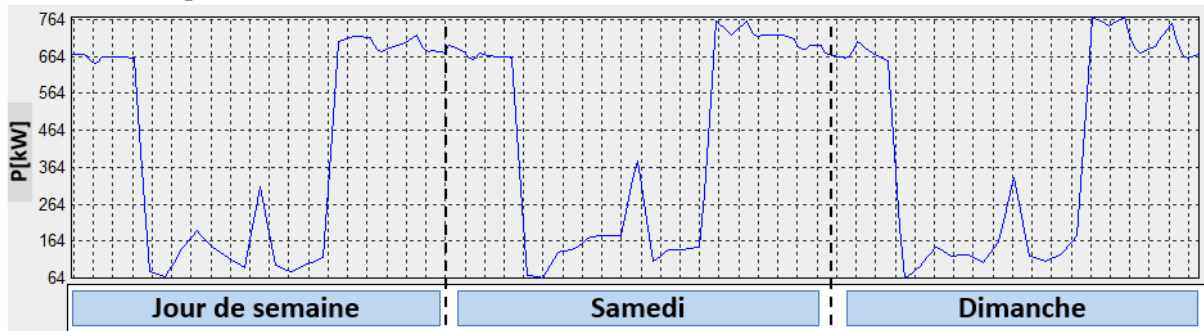


Figure 26: Simulation semaine d'automne du modèle de quartier de ville avec 100% de VE, recharges gérées par EMS.
 $P_{max} = 800kW$

6.2.5.2.3. Renforcement du réseau

Un renforcement réseau de 2MW réglerait les problèmes de pics de puissance mais un tel chantier engloberait au moins un km de câble.

6.2.5.3. Discussion

Le passage complet à la mobilité électrique sera un vrai problème pour les quartiers d'habitations de ville. La forte densité de population et le fait que les bornes de recharges installées dans les parkings sont d'office à 22kW impliquent des ponctions de puissance incomparable avec les besoins préalables. Le réseau ne peut pas supporter de tels charges et doit donc être protégé ou modifié en conséquence. Comme point de comparaison, la ville de Martigny consomme au plus 25MW pic. Il suffirait donc de 10 quartiers ou 20 immeubles de grandes tailles pour doubler la puissance nécessaire pour la ville.

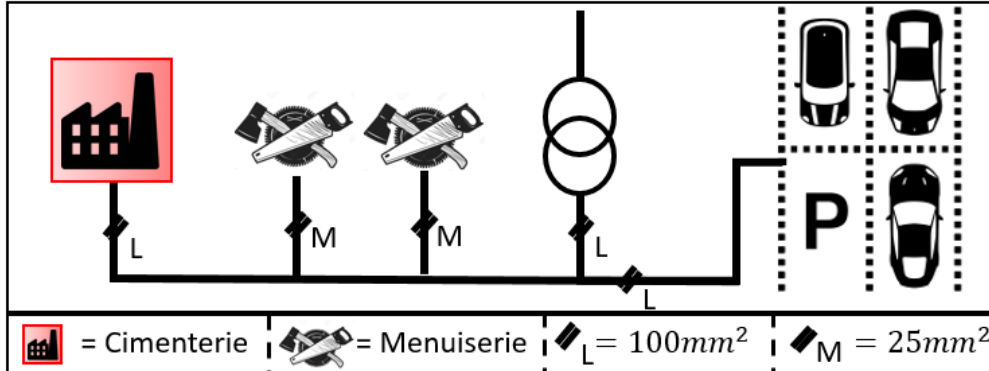
La solution la plus simple est de renforcer le réseau pour 760'000 CHF. - environ. Une autre solution serait d'installer une grosse batterie de quartier pour compenser les pics et faire du réglage primaire le reste du temps. Cette batterie nécessiterait une capacité de 9MWh pour un coût estimé à 4.5 millions. Enfin, un EMS pourrait être installé dans le parking même pour orchestrer les recharges, diminuant ainsi les pics et maximisant les tarifs plus bas aux heures creuses. Cet EMS ne serait en revanche pas suffisant à lui seul et une batterie (ou un autre système de stockage) devrait être installé à proximité pour fournir la puissance manquante aux heures pleines. Ce système de stockage nécessiterait une puissance de décharge minimum de 300kW et une capacité de 3.6MWh. Il serait estimé à 1.8 millions de CHF.-.

Il en ressort donc qu'un EMS couplé à une batterie est la solution la plus optimale jusqu'à 50% de VE après quoi le renforcement du réseau devient la solution la moins chère. Cependant, cela implique des travaux intrusifs sur une période plus ou moins longue que les habitants n'accepteront peut-être pas.

6.3. Quartiers industriel

6.3.1. Données de simulation et hypothèses

Afin de simuler les conditions d'un quartier industriel, les courbes de charge d'une cimenterie et d'une menuiserie (voir annexe 3) ont été utilisées. Le quartier obtenu est décrit par la figure 29. Ce modèle permet de déterminer l'influence de l'ajout de bornes de recharge sur le réseau local. Ces bornes pourraient être installées par les entreprises pour leurs employés ou leurs véhicules de fonction.



Afin de simuler l'influence des recharges dans ce modèle, les hypothèses suivantes ont été faites :

- ❖ Les 3 entreprises et le parking sont reliés à un transformateur de 630kVA
- ❖ Chaque voiture électrique est assumée complètement vidée en arrivant le matin à 08h00, l'après-midi à 13h00 et finalement le soir à 17h00.
- ❖ Afin de simuler le cas le plus défavorable, tous les conducteurs chargent leurs voitures électriques en même temps.
- ❖ Les bornes de recharge installées dans le parking sont d'office des 22kW.
- ❖ Le potentiel photovoltaïque des entreprises a été ignoré de par le rapport disproportionné entre la surface de production disponible et la consommation des entreprises.
- ❖ Le prix d'une batterie est estimé à 500CHF. - le kWh et le renforcement à 150'000 CHF. - le MW + 400CHF. - le mètre de câble.

6.3.2. Simulation sans VE

Le quartier décrit en 7.3.1 a été simulé sur une période de 1 an afin d'étudier les variations de la consommation et la marge de puissance à disposition du quartier.

Le printemps est la saison la plus chargée car c'est le moment où la cimenterie est la plus active, les autres saisons étant utilisées pour l'entretien, etc... Le réseau a donc été dimensionné pour supporter les pics de puissances de printemps.

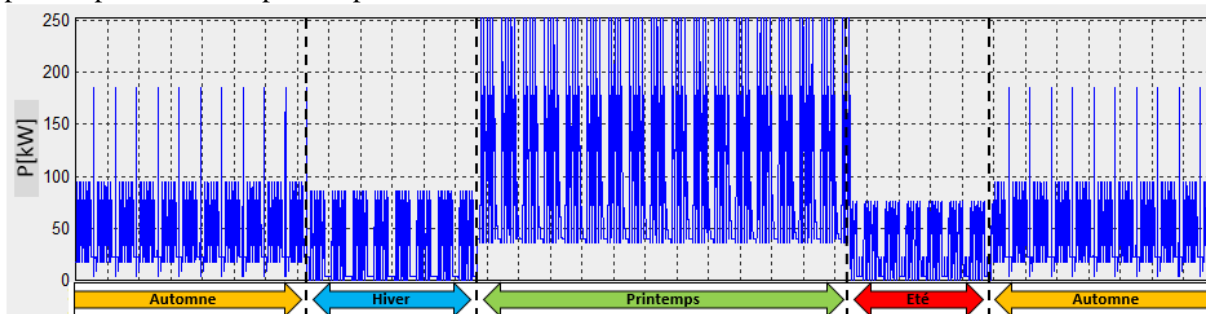


Figure 28: Simulation sur 1 an du modèle de quartier industriel sans VE. $P_{max} = 250kW$

Typique d'un quartier industriel, la consommation durant le week-end est réduite à quelques systèmes mineurs comme des ordinateurs. La semaine, les pics de consommation se regroupent depuis la fin de la matinée jusqu'en fin de soirée.

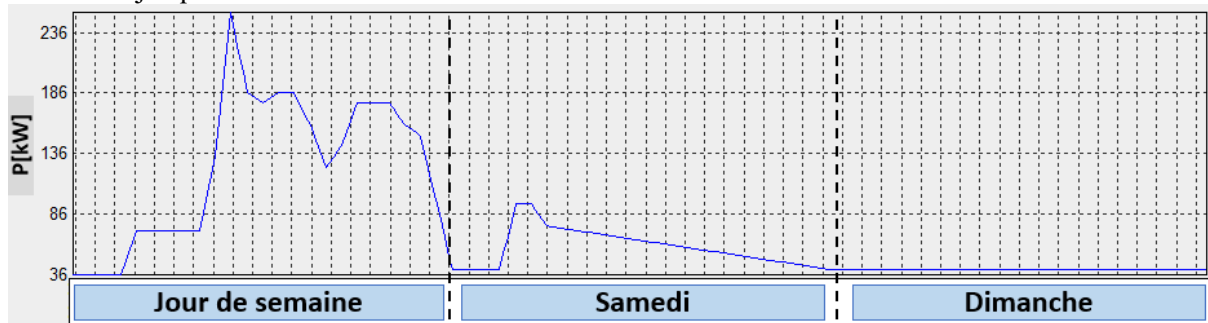


Figure 29: Simulation sur 1 semaine de printemps du modèle de quartier industriel sans VE. $P_{max} = 250kW$

Le réseau est surdimensionné par sécurité et une marge de puissance de 60% est à disposition pour contrer les aléas énergétiques.

6.3.3. Simulation avec 100% de VE

Ce scénario extrême permet d'étudier si ce nombre moyen de véhicules suffit à poser problème à un réseau dimensionné pour de gros consommateurs.

6.3.3.1. Résultats

L'ajout des bornes de recharge fait passer les pics de puissance de 250kW à 1.45MW, soit presque 6 fois plus. Le transformateur n'est pas en mesure de supporter une telle charge et serait forcé de se déclencher si les bornes ne possédaient pas de sécurité pour contrer une chute de puissance. Des mesures doivent donc être prises pour renforcer ou protéger le réseau.

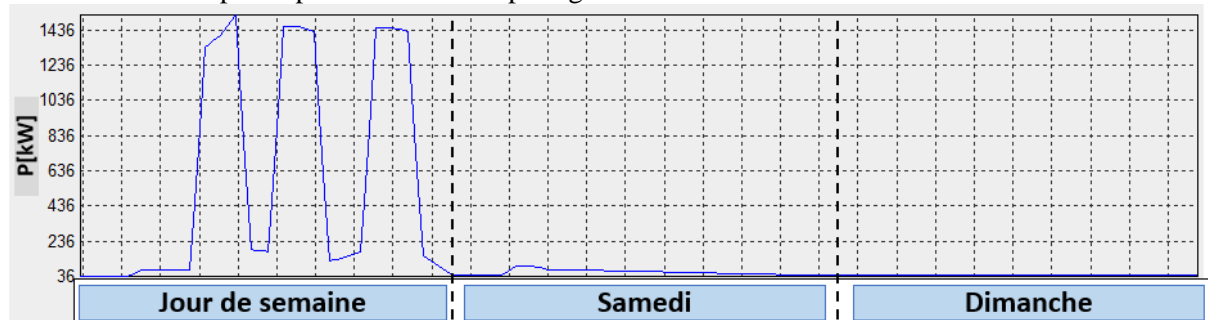


Figure 30: Simulation sur 1 semaine de printemps du modèle de quartier industriel avec 50 VE. Recharges synchronisées $P_{max} = 1.45MW$

6.3.3.2. Solutions possibles

6.3.3.2.1. Gestion intelligente de la consommation

La gestion via EMS n'est pas difficile à installer dans ce contexte car une même entité possède et contrôle l'intégralité des bornes qui sont proches géographiquement. La difficulté repose dans les heures de recharge variées et le mouvement des véhicules. Le temps de repos est réduit et donc la possibilité de différer les recharges aussi. Malgré ces contraintes, l'EMS réduit les pics de puissance qui culminent alors à 400kW, soit une baisse de plus de 70%. Le réseau possède malgré tout encore 36% de marge de puissance ce qui est satisfaisant.

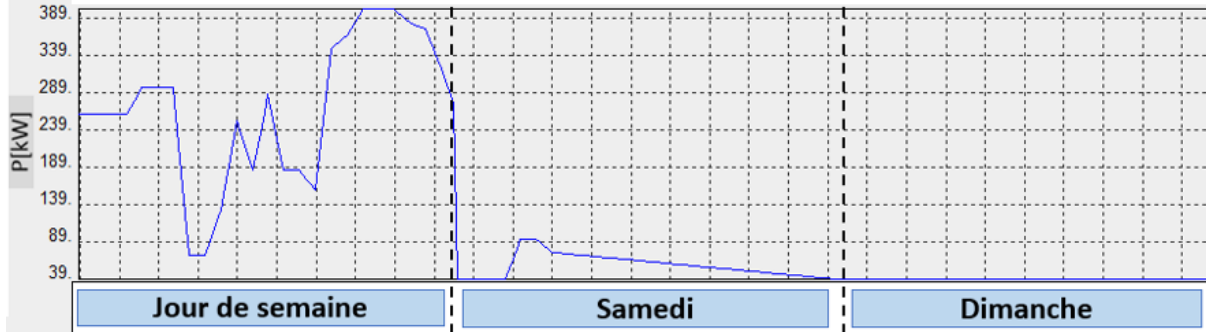


Figure 31: Simulation sur 1 semaine de printemps du modèle de quartier industriel avec 50 VE. Recharges gérées par EMS. $P_{max} = 400kW$

6.3.3.2.2. Introduction d'une production énergétique

L'ajout d'une centrale photovoltaïque apporte une influence positive sur la courbe de charge du quartier. Cependant, un apport de 30 à 50kW limité au milieu de journée ne parvient pas à compenser la consommation normale des entreprises concernées. Une addition si faible fera passer les pics de puissance de 1.45MW à 1.42MW au mieux, laissant le réseau largement instable. Une installation de grande taille entrainerait également des risques de surtension sur la ligne le week-end car il n'y a alors aucune consommation sur place pour contrebalancer la production.

6.3.3.2.3. Système de stockage énergétique et renforcement du réseau

L'ajout d'un système de stockage comblerait les creux de puissance du transformateur tout en se rechargeant aux heures sans recharge. Un tel système nécessiterait un minimum de 1MW de puissance de décharge et de 3MWh de capacité.

6.3.3.3. Discussion

L'ajout de bornes de recharge implique une déstabilisation du réseau qui nécessite une intervention pour sauvegarder le réseau électrique local. L'ajout d'une production photovoltaïque sur les toits des différentes entreprises serait un atout car l'autoconsommation serait proche des 100% du fait de la consommation quasi-constante en journée du quartier. Cependant, les puissances produites sont trop faibles et inconsistantes pour contrer efficacement les besoins apportés par les recharges de voitures électriques.

La mise en place d'un EMS produit des résultats satisfaisants pour une fraction des coûts et inconvénients des autres solutions. En effet, renforcer le réseau implique des coûts à hauteur de 600'000 CHF. - ainsi qu'un temps de travail étendu. L'ajout d'un système de stockage serait plus rapide mais plus cher à environ 1.5 millions. Ainsi l'EMS reste la solution la plus pratique et économique.

L'installation des bornes de recharge étant vue comme un don de l'entreprise à ses travailleurs, il est peu probable que cette dernière accepte de dépenser de grosse somme et de mettre en pause sa chaîne de production pour une tâche annexe au final facultative. L'ajout d'un EMS pourrait être fait durant l'installation initiale, réduisant l'inconvénient au minimum.

6.4. Centre commercial

6.4.1. Données de simulation et hypothèses

La simulation du réseau électrique lié a été réalisée à partir de courbes de charge fournies par un GRD local. Le modèle consiste en un centre de commercial de grande taille et du parking de 200 places qui y est relié. Les courbes de charges utilisées sont disponibles en annexe 3.

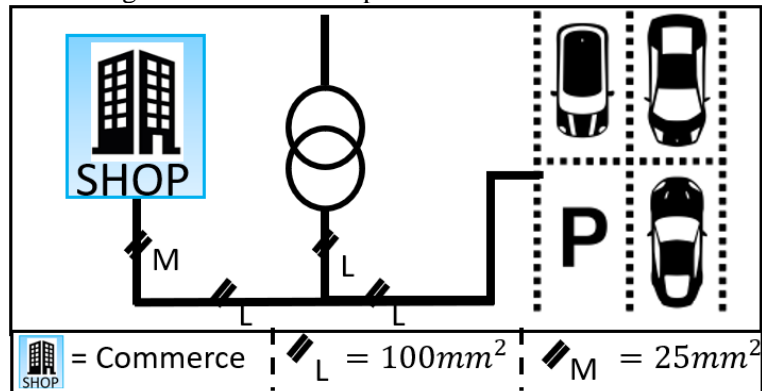


Figure 32: Schéma du modèle de centre commercial équipé d'un parking de 200 places pour les clients.

Afin de simuler l'influence des recharges dans ce modèle, les hypothèses suivantes ont été faites :

- ❖ Le centre commercial et le parking sont reliés à deux transformateurs de 1000kVA en parallèle, l'un étant en permanence gardé en réserve par sécurité.
- ❖ Chaque place de parking possède le même taux d'occupation qui varie selon la journée pour simuler le va-et-vient des clients.
- ❖ Les bornes de recharge installées dans le parking sont d'office des 22kW.
- ❖ Le potentiel photovoltaïque du centre commercial a été ignoré de par le rapport disproportionné entre la surface de production disponible et la puissance nécessaire.
- ❖ Le prix d'une batterie est estimé à 500CHF. - le kWh et le renforcement à 150'000 CHF. - le MW + 400CHF. - le mètre de câble.

6.4.2. Simulation sans VE

Le quartier décrit en 7.4.1 a été simulé sur une période de 1 an afin d'étudier les variations de la consommation et la marge de puissance à disposition du quartier.

La consommation reste assez constante durant l'année avec un léger pic en été. Cette uniformité est typique d'un centre commercial qui doit maintenir les mêmes conditions artificielles pour ses produits tout le long de l'année. Le pic d'été est entre autres dû aux efforts supplémentaires pour réfrigérer la nourriture, pareillement pour l'automne mais à un plus faible degré.

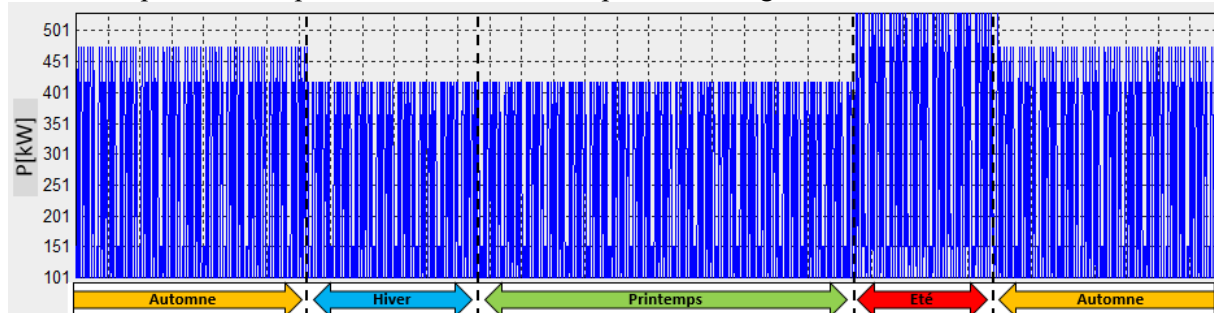


Figure 33 : Simulation sur 1 an du modèle de centre commercial sans VE. $P_{max} = 525kW$

L'analyse hebdomadaire met en évidence l'uniformité de la consommation qui se répète sans grandes variations sauf pour le dimanche quand le magasin est fermé.

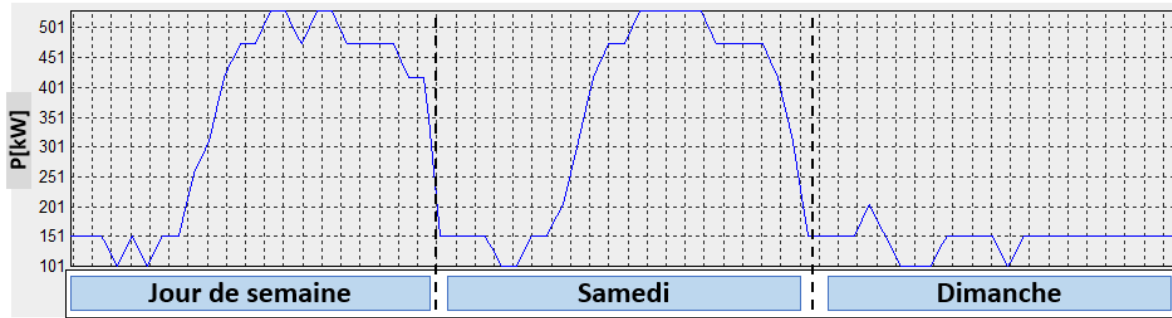


Figure 34: Simulation sur 1 semaine d'été du modèle de réseau de centre commercial sans VE. $P_{max} = 525kW$

6.4.3. Simulations

6.4.3.1. Résultats

Les trois scénarios ont été simulés et les puissances pics enregistrées se sont immédiatement montrées problématiques avec un pic à 5.55MW à 100 de VE. L'ajout de 30 bornes de recharge implique une augmentation importante des pics de puissance qui dépassent la puissance limite du transformateur. Ainsi, même le scénario le plus favorable est déjà trop pour le transformateur local.

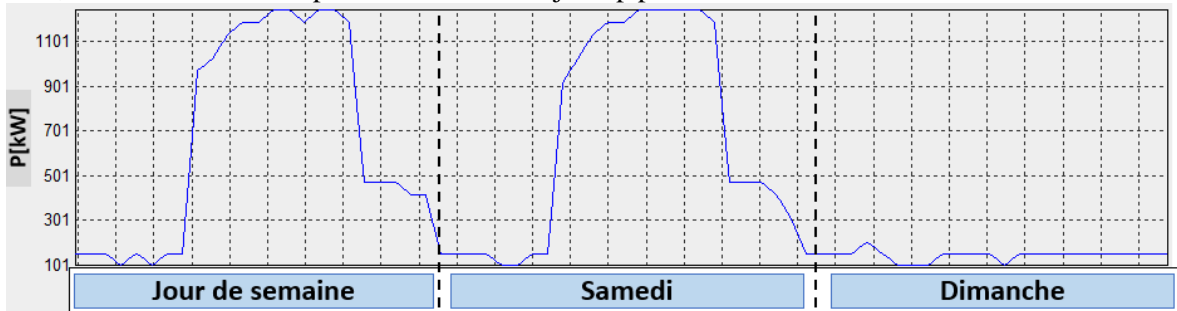


Figure 35: Simulation semaine d'été du modèle de centre commercial avec 15% de VE, soit 30 bornes de recharge. $P_{max} = 1.125MW$

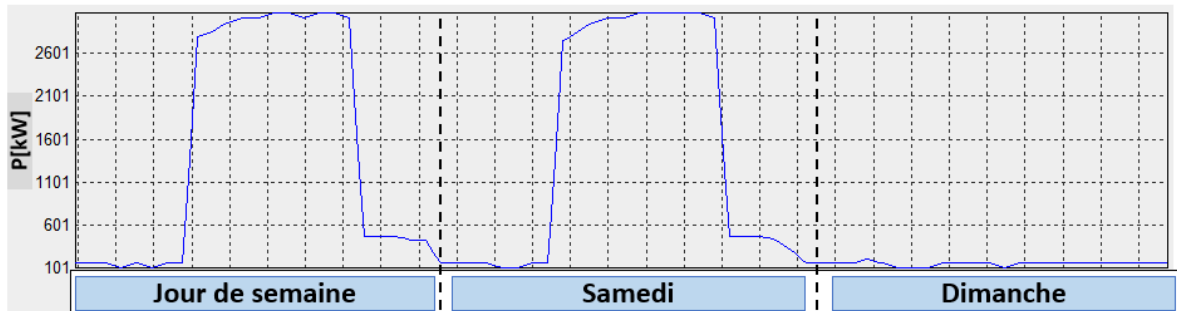


Figure 36: Simulation semaine d'été du modèle de centre commercial avec 50% de VE, soit 100 bornes de recharges. $P_{max} = 3.05MW$

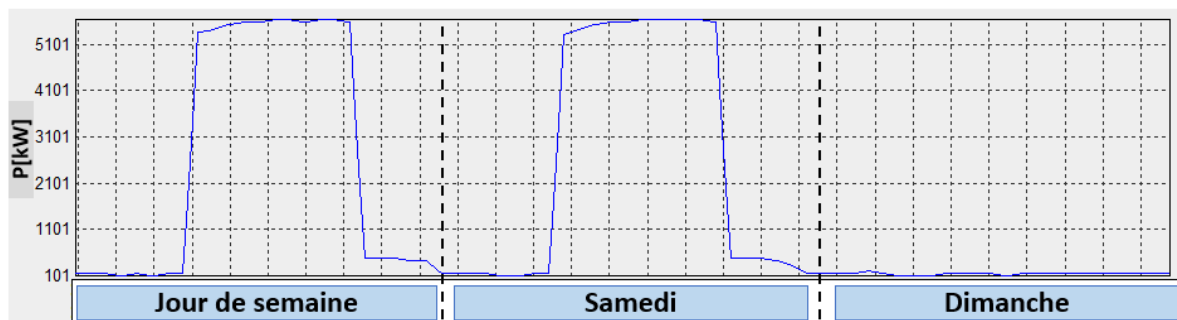


Figure 37: Simulation semaine d'été du modèle de centre commercial avec 100% de VE, soit 200 bornes de recharge. $P_{max} = 5.55MW$

6.4.3.2. Solutions possibles

6.4.3.2.1. Gestion intelligente de la consommation

L'implémentation d'un EMS dans le parking est techniquement possible et ne demanderait que peu d'effort. Cependant, les clients du centre commercial viennent en continu et les bornes sont en permanence utilisées à 100% de leurs puissances. Il n'y a donc aucune régulation à faire si ce n'est une sécurité qui stoppe ou ralentit la recharge en cas de surcharge du transformateur. Le confort du client est alors sacrifié. La gestion énergétique intelligente est donc inefficace pour ce modèle de réseau électrique. Une solution alternative consisterait à utiliser les deux transformateurs en même temps au lieu d'en garder un en réserve. En cas de défaut, l'EMS couperait immédiatement les recharges, sécurisant le transformateur survivant.

6.4.3.2.2. Système de stockage énergétique

L'ajout d'un système de stockage pourrait combler les creux de tension aux heures de pointe mais dans ce contexte, le système devrait fournir une puissance pouvant monter jusqu'à 5MW pendant près de 11 heures. Un tel système coûte cher et surtout nécessite une place importante qu'un centre commercial n'a pas forcément à disposition. Le système de stockage énergétique ne convient donc pas à ce modèle.

6.4.3.2.3. Renforcement du réseau

Le renforcement du réseau permettrait de régler les problèmes de puissance directement sans risque de surcharge. Cependant, il coûterait cher d'une part à cause des travaux eux même mais également à cause du temps d'arrêt du centre commercial durant le chantier. Un tel investissement est peu probable surtout pour une simple action client.

6.4.3.3. Discussion

Le réseau électrique du modèle est rapidement surchargé par l'ajout d'un grand nombre de bornes de recharge toutes de 22kW. La marge disponible initialement est moins élevée que dans les autres modèles car un deuxième transformateur est installé pour contrer les défauts ou problèmes de surconsommation. Il en résulte que même le scénario le moins extrême dépasse les limites du transformateur.

Les solutions à disposition sont toutes inintéressantes car elles sont soit inefficaces comme l'EMS, soit demande un trop gros investissement pour un trop faible retour. Un système de stockage suffisant serait estimé à 27.5 millions et un renforcement à 1.15 millions de CHF. - au moins.

Par conséquent, il est peu probable que les anciens centres commerciaux installent un grand nombre de bornes de recharge. Si elles sont installées malgré tout, des sécurités seront mises en place pour ralentir ou couper les recharges en cas de problèmes. Mais seuls les nouveaux centres implémenteront peut-être des transformateurs plus puissants pour accommoder ces recharges.

6.5. Station-service

6.5.1. Données de simulation et hypothèses

3 modèles de stations-service ont été défini pour fournir à l'analyse une vision plus globale :

Le premier modèle se focalise sur des stations-service trouvables dans des localités de tailles moyennes à grandes. Ces stations sont en général équipées de 4 à 12 bornes à essence et se sentant menacée par l'avènement de la voiture électrique, elles vont décider de se pourvoir de borne de recharge ultra-rapide pour éviter de perdre de la clientèle.

Le deuxième modèle traite les stations de recharge qui seront prochainement installée sur les aires de repos²². Ces stations seront équipées pour fournir une puissance très importante à au moins 10 voitures à la fois, permettant ainsi aux conducteurs de s'arrêter le moins de temps possible.

Le troisième modèle simule un centre de recharge de grande taille qui sera prochainement construit à Bâle en 2023. La gestion du centre sera sans doute pensée pour diminuer au maximum la puissance nécessaire mais ce modèle simule le pire scénario où l'ensemble des bornes sont utilisées en même temps.

Afin de simuler l'influence des recharges dans ce modèle, les hypothèses suivantes ont été faites :

- ❖ Les stations-service de ville sont reliées à un transformateur de 630kVA mais ne peuvent pas consommer plus de 30% de sa puissance, le reste étant utilisé par les autres consommateurs.
- ❖ Chaque borne de recharge possède le même taux d'occupation qui varie selon la journée pour simuler le va-et-vient des clients, voir annexe 4.
- ❖ Le potentiel photovoltaïque du centre commercial a été ignoré de par le rapport disproportionné entre la surface de production disponible et la puissance nécessaire.
- ❖ La gestion intelligente de la consommation est impossible en dehors des mesures de sécurité car les clients veulent la puissance maximale en permanence et de même pour ceux qui les suivent.
- ❖ Le prix d'une batterie est estimé à 500CHF. - le kWh et le renforcement à 150'000 CHF. - le MW + 400CHF. - le mètre de câble.

6.5.2. Simulation sans VE

Une première simulation a été faite pour évaluer la courbe de charge d'une station-service de taille moyenne trouvable aux abords d'une ville.

Avec des pics de puissances maximaux de 26kW, une station-service actuelle peut être classifiée comme un consommateur moyen équivalent environ 7 maisons chauffées par PAC. La limite de puissance qui lui est attribuée ne devrait donc pas dépasser les 90kW auquel cas le réseau pourrait être à risque.

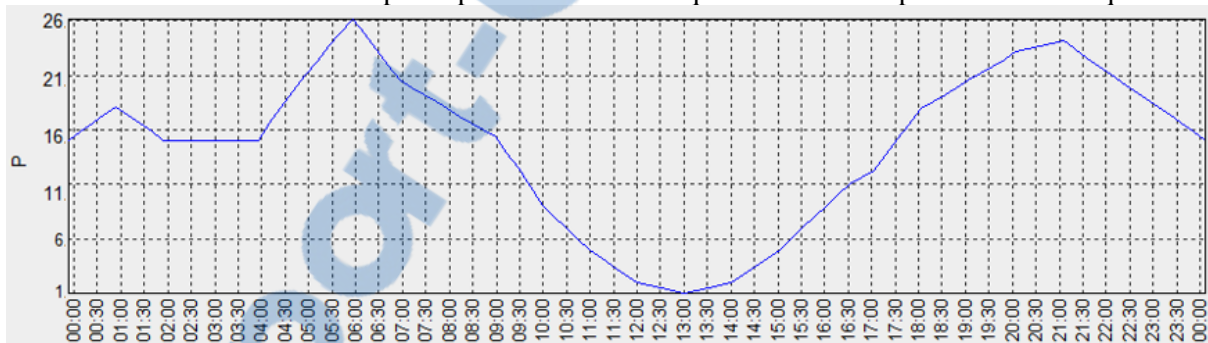


Figure 38: Simulation de la consommation journalière d'une station-service de ville classique. $P_{max} = 26kW$

6.5.3. Simulation station-service de ville

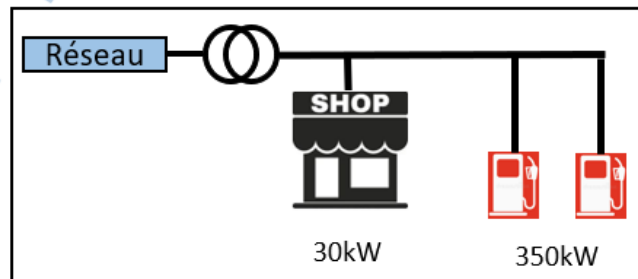


Figure 39: Modèle de station-service de ville.

6.5.3.1. Résultats

L'ajout des bornes de recharge change complètement la courbe de charge de la station-service. La consommation de puissance est incomparable avec les valeurs originelles. Les pics de puissance sont passés de 26kW à 745kW ou 28 fois plus.

La consommation de la station-service sera volatile car il suffit que deux clients arrivent à une heure habituellement creuse pour qu'un pic de puissance à 700kW pendant 15 minutes se manifeste. Les stations-service pouvant être ouvertes 24h/24h, le GRD devrait en permanence être prêt à fournir une puissance non-négligeable pour un temps bref.

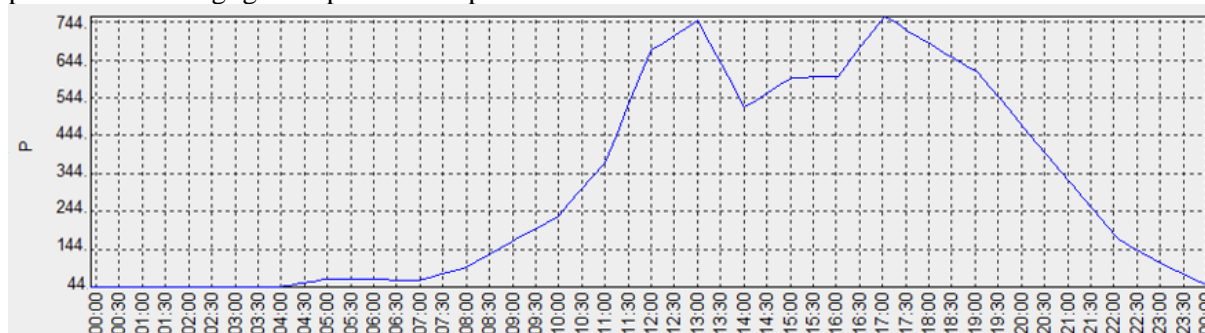


Figure 40: Simulation consommation journalière d'une station-service de ville équipée de 2 bornes de recharge ultra-rapide.
 $P_{max} = 745kW$

6.5.3.2. Solutions possibles

6.5.3.2.1. Système de stockage énergétique

Un système de stockage énergétique capable de fournir une puissance importante en peu de temps pourrait diminuer la charge sur le réseau. Cependant, le système devrait être active à chaque fois que plus d'un client arrive. Si les deux bornes de recharges sont actives, la consommation monte immédiatement à 600kW, ce qui est largement trop pour le transformateur. Le système de stockage devrait donc être actif en permanence la majorité de la journée ce qui implique une capacité énorme de 9MWh pour un coût de 4.5 millions de CHF.-.

6.5.3.2.2. Renforcement du réseau

Le renforcement du réseau permettrait de relier un transformateur de 1000kVA à la station-service, résolvant l'ensemble des problèmes de puissance de la station. Le renforcement nécessiterait des travaux mais l'implémentation des bornes en demanderait aussi et les deux pourraient être réalisés ensemble.

6.5.3.3. Discussion

Les stations-service actuelles sont traitées comme des commerces de taille moyenne capables de produire des pics de puissance pouvant atteindre les 30kW. L'ajout des bornes de recharges ultra-rapides transforme ces stations-service en des consommateurs nécessitant des pics de puissance supérieures à ceux d'un quartier industriel en plein après-midi.

Une telle disparité de consommation ne peut pas être réglée par une solution « smart » aussi le renforcement du réseau est la seule solution viable.

6.5.4. Simulation station-service d'autoroute

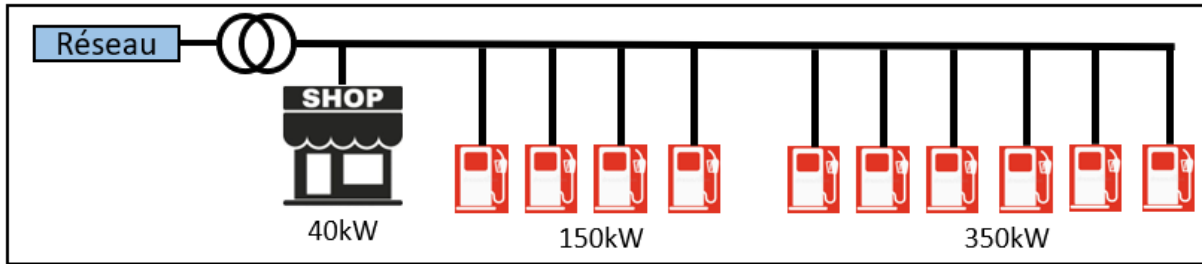


Figure 41: Modèle de station de recharge ultra-rapide trouvée sur une aire de repos.

6.5.4.1. Résultats

Une station de recharge ultra-rapide de cette taille va nécessiter un transformateur disposant d'une puissance minimum de 3MW mais une puissance limite de 4MW apporterait plus de sécurité. Il est à noter que la figure 44 décrit une moyenne de puissance par heure. Sur le terrain, la puissance varierait constamment entre le pic à 2.8MW et le minimum à 175kW selon la proportion de clients.

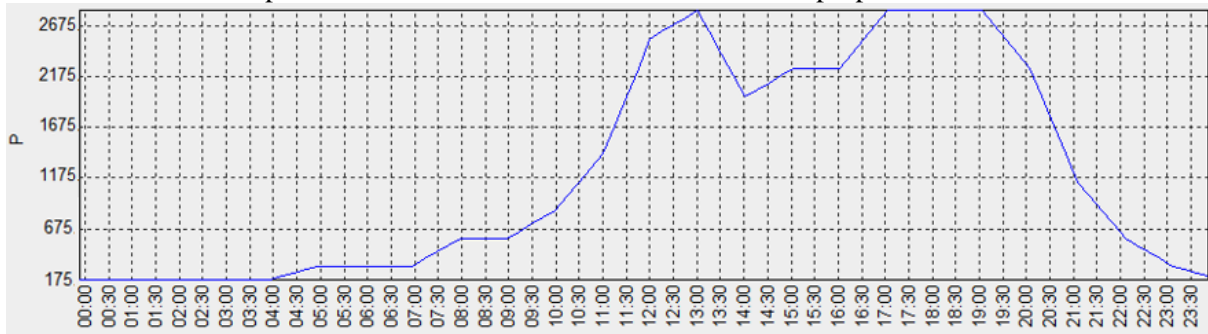


Figure 42: Simulation consommation journalière d'une station de recharge sur aire de repos équipée de 10 bornes de recharge ultra-rapide. $P_{max} = 2.8MW$

6.5.4.2. Discussion

Les aires de repos actuelles sont équipées de transformateur à faibles puissances car elles n'ont besoin que de quelques toilettes et d'éclairage. Certaines sont également complètement dénuée d'alimentation électrique. Ces réseaux électriques mineurs ne pourraient jamais supporter des recharges ultra-rapides. C'est pourquoi l'installation d'une station de recharge sur une autoroute comportera la mise en place d'un transformateur propre à la station. Une centrale photovoltaïque locale peut être également installée mais elle n'apportera qu'un faible apport et ne changera en rien la dynamique énergétique de la station de recharge.

6.5.5. Centre de recharge

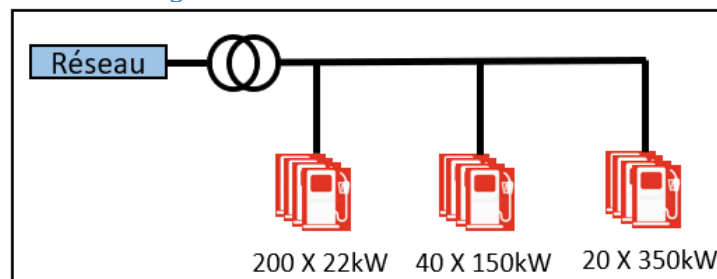


Figure 43: Modèle simulant le futur centre de recharge de Bâle (2023)

6.5.5.1. Résultats

La puissance nécessaire pour alimenter un tel nombre de bornes de recharge est très élevée. Un pic de puissance à 19,5MW correspond à environ 2% de la production d'une station nucléaire qui serait réservée pour un parking sophistiqué.

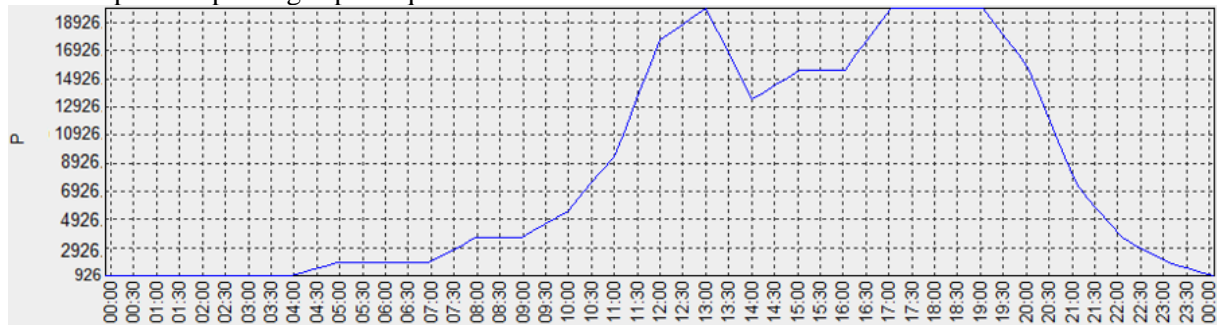


Figure 44: Simulation de la consommation journalière du futur centre de recharge de Bâle (2023). Borne de recharge: 220 de 22kW, 40 de 150kW, 20 de 350kW. $P_{max} = 19.5MW$

6.5.5.2. Discussion

Un tel centre de recharge nécessitera une puissance comparable à celle nécessaire pour alimenter une ville. Il est cependant peu probable que ces pics se manifestent car le système de gestion énergétique qui sera installé sur place fera sans doute tout pour diminuer et espacer les charges. Il est également improbable que l'ensemble des bornes de recharges soit occupé simultanément. Les gestionnaires du projet décideront si l'installation doit être dimensionnée selon le cas le plus probable ou le pire car envisageable. Dans le deuxième cas, un transformateur d'une puissance minimum de 24MW devra être installé.

7. Difficultés d'implémentations et défauts des solutions

7.1. Système de gestion énergétique (EMS)

Selon la situation, la facilité d'implémentation d'un EMS varie grandement. Un village étant composé uniquement de partis privés, une collaboration serait difficile à former d'autant que les différentes bornes n'auront pas été installées par les mêmes entreprises et seront de modèles différents. Ces difficultés rendent peu probable la mise en place d'un EMS dans un village préexistant. Ce type de système est plus adéquat pour un parking accueillant un grand nombre de bornes identiques.

Une autre faiblesse de ce système est son inefficacité en cas de recharge constante. Une régulation qui priorise les besoins du client ne peut pas différer la recharge si l'utilisateur souhaite passer le moins de temps possible sur place. Ainsi, un EMS ne peut qu'assurer la sécurité du réseau dans un centre commercial ou une station-service.

7.2. Ajout d'une production énergétique renouvelable

L'ajout d'une production indigène d'énergie est un atout d'un point de vue énergétique et devrait toujours être considéré. Cependant, les puissances produites par ces installations sont toujours nettement inférieures à celles consommées par les différentes installations. Cet ajout se rapproche donc plus d'une aide que d'une solution aux problèmes de réseaux posé par les recharges de voitures électriques.

Cette production peut même être problématique dans un quartier d'habitation car la production peut dépasser largement la consommation et produire des surtensions sur la ligne. Les réseaux actuels n'ont pas été faits pour gérer voire même détecter ce type d'anomalies. Ainsi une habitation équipée de panneaux photovoltaïques et d'une borne de recharge pourrait surproduire durant la journée pour ensuite surconsommer la nuit comme les temps de production et de recharges sont différents.

7.3. Système de stockage énergétique

Ce type de système possède un certain nombre de bénéfices et de défauts qui varient selon la technologie utilisée, mais 3 restent constants. Le prix d'installation est élevé, le système nécessite du temps pour se charger et l'installation nécessite une place non négligeable à hautes capacités.

Ces caractéristiques font du stockage énergétique une solution inadaptée pour les stations-service, les centres commerciaux et les quartiers de villes. La consommation de ces lieux est bien trop continue pour permettre une charge optimale du système. Les capacités nécessaires seraient également problématiques de par la place à attribuer et la somme à investir. Dès que la puissance à compenser dépasse le MW, le renforcement devient économiquement plus intéressant que le stockage énergétique.

Les quartiers d'habitations d'un village sont en revanche parfaitement adaptés pour cette solution car ils bénéficient d'une place suffisante et les niveaux de puissance impliqués ne dépassent pas le MW. La durée de vie du système ainsi que son remplacement doivent cependant être pris en compte.

7.4. Renforcement du réseau

Ce dernier recourt devra être utilisé dans les cas les plus extrêmes comme les stations-service et les quartiers de villes. S'il est également applicable dans la totalité des autres cas, il existe des alternatives plus « smart ».

Les dangers d'un surdimensionnement trop systématique est la multiplication des transformateurs. Si une ligne moyenne tension capable de supporter 1MW est habituée à en distribuer 0.7MW et qu'une multitude de nouveaux transformateurs demandent 0.5MW supplémentaires, elle sera surchargée. Le renforcement d'une ligne de cette taille implique des travaux extrêmement coûteux ainsi qu'un chantier de plusieurs mois. Les GRD ont donc tout intérêt à éviter cette situation en trouvant des solutions locales pour différer les appels de puissance.

8. Conclusion

Ce travail visait à déterminer l'état actuel de la mobilité électrique suisse, son développement futur ainsi que l'influence que ce dernier aura sur les réseaux électriques.

La voiture électrique est actuellement une minorité en Suisse, représentant seulement 0.32% du parc routier, cela malgré une augmentation annuelle moyenne de 53%. Cependant ce pourcentage est amené à monter de par les promesses de l'état et l'opinion populaire selon laquelle « mobilité future = mobilité électrique ». L'objectif audacieux de 15% de voiture électrique (VE) en 2022 visé par le gouvernement prouve le potentiel de croissance de cette mobilité.

La technologie de cette mobilité est quant à elle bientôt à terme. Les modèles les plus récents possèdent des performances de conduites similaires voire supérieures aux véhicules thermiques classiques. Mais la capacité et la puissance de charge restent les deux points faibles majeurs de cette mobilité. Si des progrès ont été faits, seuls les modèles les plus chers atteignent l'autonomie d'une voiture thermique.

Ce problème de capacité s'est traduit par l'augmentation massive du nombre de bornes de recharge dans le pays qui a dépassé le millier en 2018. Les aires de repos sur les autoroutes sont également préparées pour accueillir des centres de recharge ultra-rapide. Cette évolution doit se poursuivre car même si plus de 80% des recharges se font à domicile, la tranquillité d'esprit des conducteurs ne sera assurée que lorsque le nombre de bornes de recharge rattrapera celui des stations-essence.

L'avènement de cette mobilité électrique impactera négativement les réseaux électriques locaux comme les quartiers d'habitations de villages. Ces derniers étant largement surdimensionnés, ils ne seront inquiétés que si la proportion de VE dépasse les 50%. Auquel cas, l'installation d'une batterie de quartier intelligente compensera les pics de puissance. Il est à noter que l'ajout d'une production solaire locale ne fait qu'empire les choses sans système de stockage énergétique.

Un quartier d'habitation dans une ville est cependant nettement plus sensible à cette mobilité électrique. Dès 15% de VE, le réseau local est presque dépassé et à 100% de VE les pics dépassent les 2.5MW. L'implémentation d'un système de gestion énergétique (EMS) s'est avérée être une solution efficace et adaptée à la structure selon les simulations. L'ajout d'une batterie d'appoint pour les cas avancés sera cependant indispensable et aux extrêmes un renforcement du réseau devient nécessaire.

Les quartiers industriels seront moins touchés de par le nombre plus faible de véhicules concernés. Malgré cela, des pics supérieurs à 1.4MW sont attendus à 100% de VE. La mise en place d'un EMS suffit à assurer la sécurité du réseau et à ramener ces pics à un niveau acceptable.

Les centres commerciaux seront particulièrement touchés de par le grand nombre de bornes de recharge impliquées mais également de par le flux constant de clients. Ces pics peuvent monter jusqu'à 5MW et un EMS est inefficace dans ce cas. La seule solution est un renforcement du réseau.

Les stations-service actuelles qui souhaiteront installer des bornes de recharges ultra-rapides pour éviter de perdre de la clientèle n'auront pas d'autre choix que de payer le renforcement de leurs lignes. Les futures stations de recharges sur les aires de repos des autoroutes nécessiteront des transformateurs capables de supporter des pics de 3MW.

Finalement, le renforcement de tant de réseaux basse tension risque de surcharger les lignes moyennes tension et causer des fluctuations de fréquences imprévisibles. Les GRD locaux devront prendre en compte ces éléments et adapter leur réseau.

Le développement futur de la mobilité électrique sera donc problématique dans les milieux avec une population dense comme les villes mais la gestion intelligente de cette nouvelle consommation limitera grandement ces appels de puissance sans nécessiter de ressources excessives. Les nouvelles installations dédiées aux recharges demanderont quant à elles un nouveau dimensionnement adéquat du réseau électrique. Les GRD devront adapter leurs réseaux pour faire face à cette nouvelle demande.

9. Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Nicolas Jordan pour son suivi et son aide précieuse durant la réalisation de ce projet. Je tiens également à remercier Nicolas pour m'avoir mis à disposition son expertise des réseaux électriques.

10. Annexes

10.1. Parc de véhicule électrique suisse

Années		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Moyenne
Total de voitures électriques (VE)	#	650	1 050	1 760	2 700	4 440	7 530	10 800	14 600	5 441
Total de voitures de tourisme (VT)	#	4 075 825	4 163 003	4 254 725	4 320 885	4 384 490	4 458 069	4 524 029	4 570 823	4 343 981
Nouvelles VE mises en circulation	#	201	400	710	940	1 740	3 090	3 270	3 800	1 769
Augmentation du nombre de VE	%	26.95	61.54	67.62	53.41	64.44	69.59	43.43	35.19	52.77
Augmentation du nombre de VT	%	1.65	2.14	2.20	1.55	1.47	1.68	1.48	1.03	1.65
Part des Ve dans le total de VT	%	0.02	0.03	0.04	0.06	0.10	0.17	0.24	0.32	0.12
Part des VE dans la mise en circulation	%	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.04	0.05	0.08	0.03

10.2. Courbe de charge centrale photovoltaïque

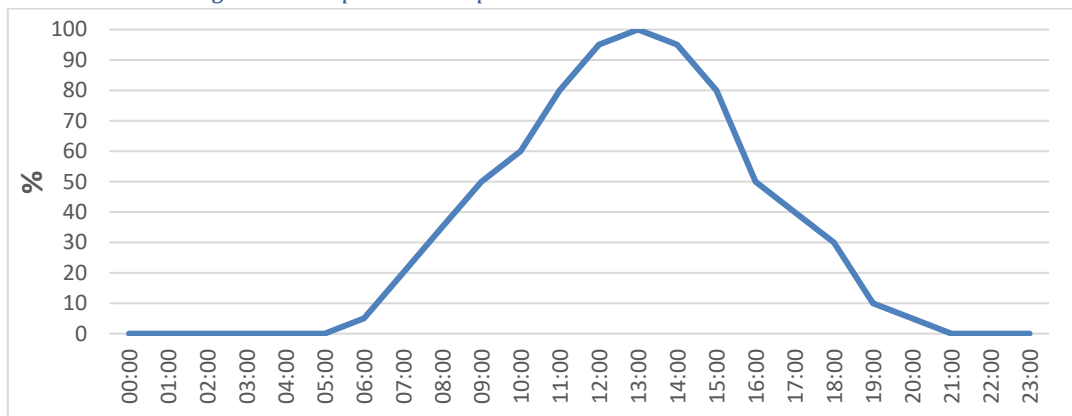


Figure 45: Courbe journalière de production photovoltaïque dans des conditions idéales

10.3. Courbes de charges journalières moyennes

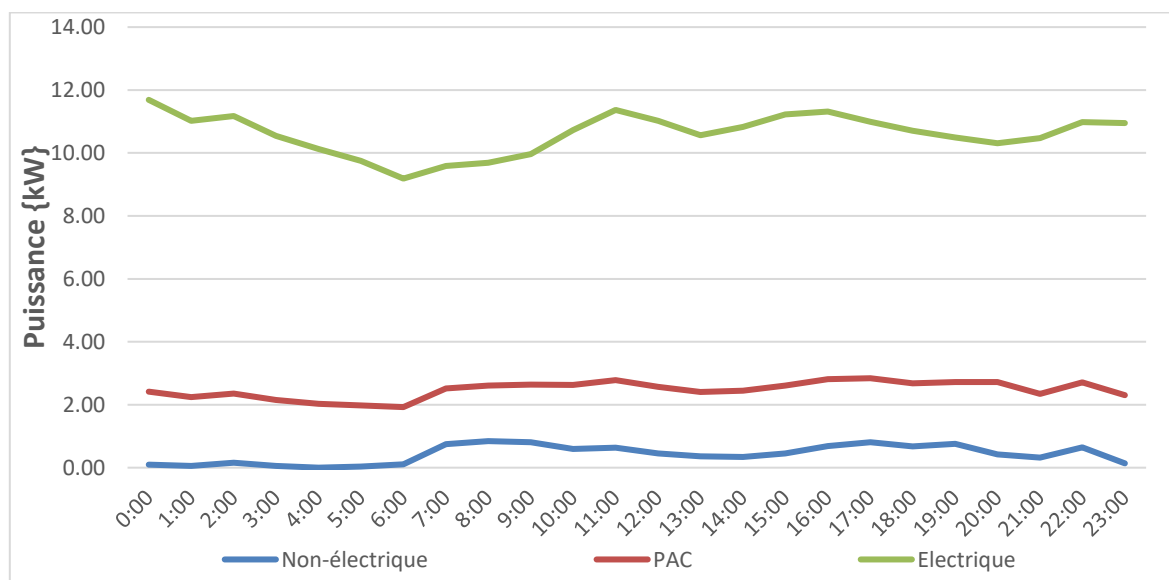


Figure 46: Courbes de charge journalières moyennes d'une maison individuelle un jour de semaine en hiver selon le système de chauffage. Tableaux sources en annexe 3

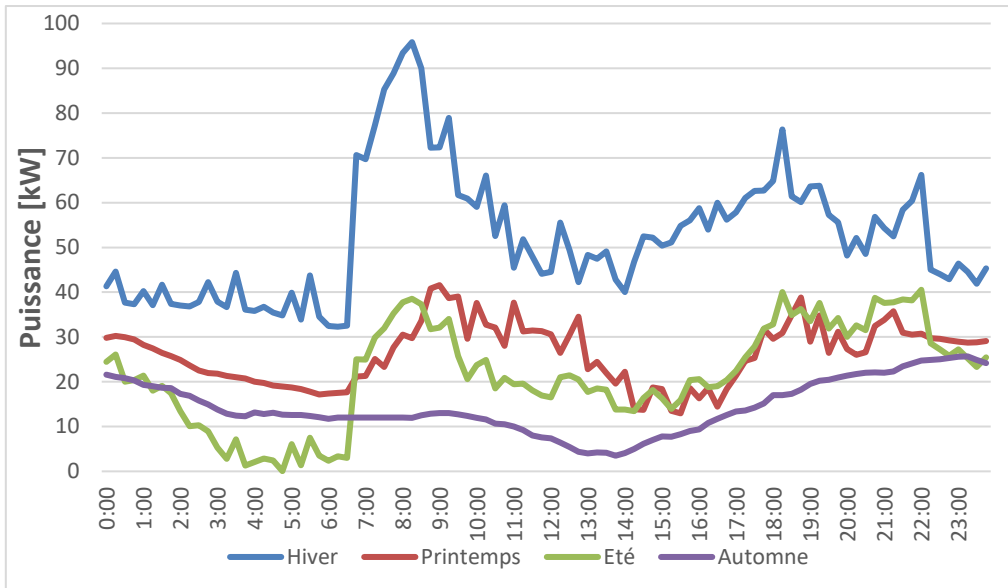


Figure 47: Courbe de charge d'un jour de semaine moyen selon la saison pour un immeuble de 52 appartements.

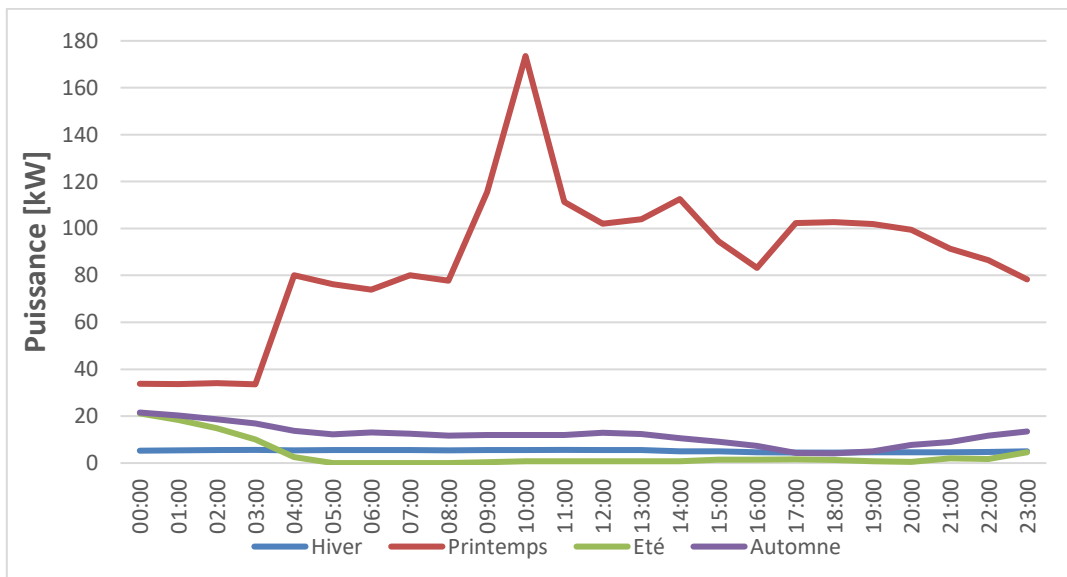


Figure 48: Courbe de charge d'un jour de semaine moyen selon la saison pour une cimenterie.

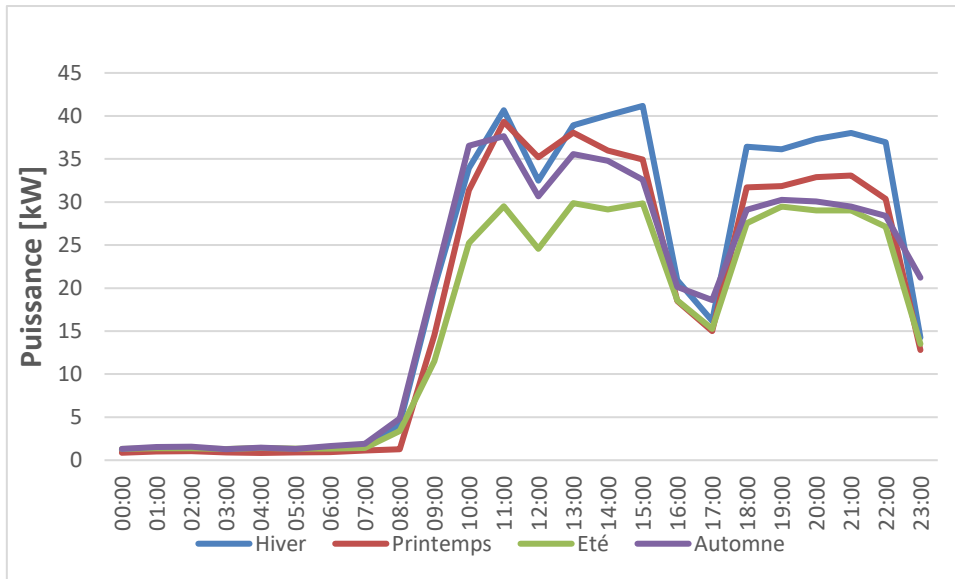


Figure 49: Courbe de charge d'un jour de semaine moyen selon la saison pour une menuiserie

10.4. Courbe de fréquentation d'une station-service

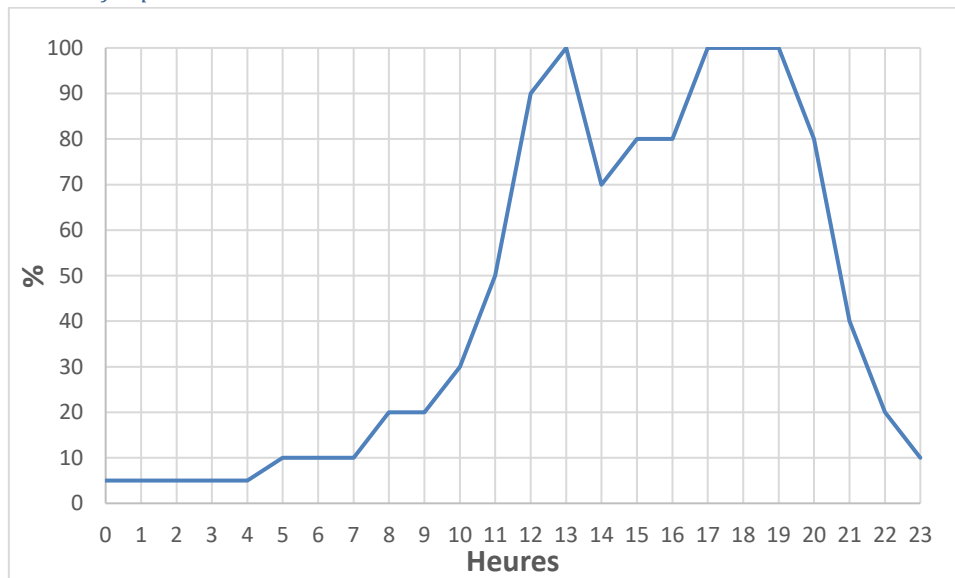


Figure 50 : Courbe de fréquentation d'une station-service classique en bordure de ville assumée constante sur la semaine.

11. Sources

- ¹ Thèse «L'acceptation de la voiture électrique: étude d'un processus, de l'acceptabilité à l'acceptation située » par Lenaïc Poupon le 14.09.2017. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01587732/document>, consulté le 16.08.2018
- ² Tech Chap1.1-2 - Rappel réseau.pdf par Nicolas Jordan, HES-SO Valais, 16.08.2018
- ³ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>, consulté le 16.08.2018
- ⁴ <http://www.automobile-propre.com/voiture-electrique/> consulté le 16.08.2018
<http://www.voiture-electrique-populaire.fr/> consulté le 16.08.2018
- ⁵ https://www.hoelzle.ch/technik/set_ladekabel_f.php consulté le 16.08.2018
- ⁶ https://m-way.ch/fr/infrastructure-de-recharge/stations-de-recharge/11571/greenmotion-borne-de-recharge-private-one-22kw-t1/t2-cable-ze-online?gclid=EAIaIQobChMI7PiVjreR3AIVQsYbCh1mnQGYEAQYASABEGKhivD_BwE consulté le 16.08.2018
- ⁷ <https://www.rts.ch/info/economie/9412373-un-site-de-recharge-ultra-rapide-pour-voitures-electriques-arrive-en-suisse.html> consulté le 16.08.2018
- ⁸ <https://www.rts.ch/info/regions/valais/9644728-les-bornes-de-recharge-pour-voitures-electriques-bientot-payantes-a-sion-.html> consulté le 16.08.2018
- ⁹ https://www.hoelzle.ch/technik/set_ladekabel_f.php consulté le 16.08.2018
- ¹⁰ <https://www.sibelga.be/fr/raccordements-et-compteurs/voiture-electrique/besoins-specifiques-bornes-de-recharge> consulté le 16.08.2018
- ¹¹ <https://www.sbb.ch/fr/abonnements-et-billets/abonnements/greenclass/prestations-de-mobilite/borne-de-recharge-domestique.html> consulté le 16.08.2018
- ¹² <https://gofastcharge.com/wp/index.php/fr/locations-f/> consulté le 16.08.2018
- ¹³ <https://www.greenmotion.ch/> consulté le 16.08.2018
- ¹⁴ <https://www.24heures.ch/auto-moto/emobilite-recharge-futur-prepare-ble/story/30668374> consulté le 16.08.2018
- ¹⁵ <http://www.hydroquebec.com/data/electrification-transport/pdf/guide-technique.pdf#page=15&zoom=auto,-73,569> consulté le 16.08.2018
- ¹⁶ <https://www.ge.ch/document/electromobilite-guide-installation-systemes-recharge-vehicules-electriques/telecharger> consulté le 16.08.2018
- ¹⁷ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/mobilite-transports/transport-personnes/comportements-transports/distance-duree-jour-deplacements.html> consulté le 16.08.2018
- ¹⁸ Thèse «L'acceptation de la voiture électrique: étude d'un processus, de l'acceptabilité à l'acceptation située » par Lenaïc Poupon le 14.09.2017. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01587732/document>, consulté le 16.08.2018
- ¹⁹ http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00542/00630/index.html?lang=fr&dossier_id=00769 consulté le 16.08.2018
- ²⁰ <https://www.rts.ch/info/suisse/9605085-doris-leuthard-souhaite-15-de-vehicules-electriques-d-ici-2022-en-suisse.html> consulté le 16.08.2018
- ²¹ Un GRD local qui a souhaité conserver l'anonymat. Consulté le 05.07.2018 et 09.08.2018
- ²² <https://www.admin.ch/gov/fr/accueil/documentation/communiques.msg-id-67308.html> consulté le 16.08.2018