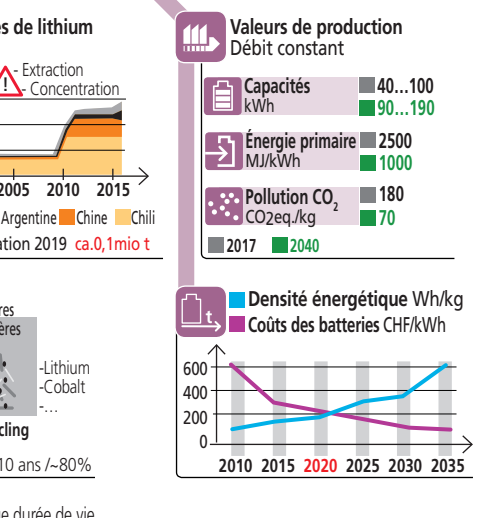
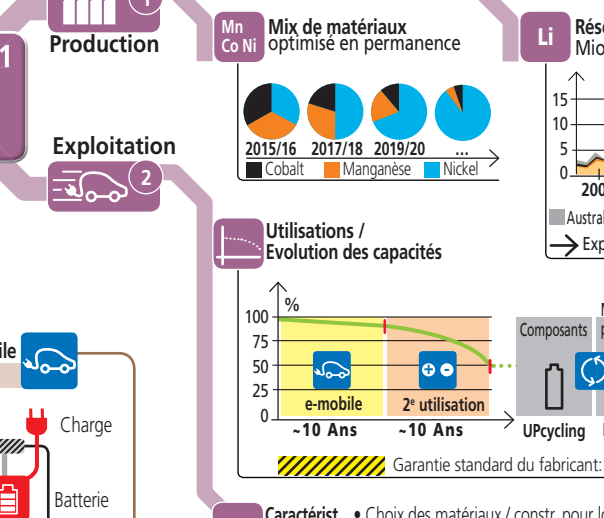
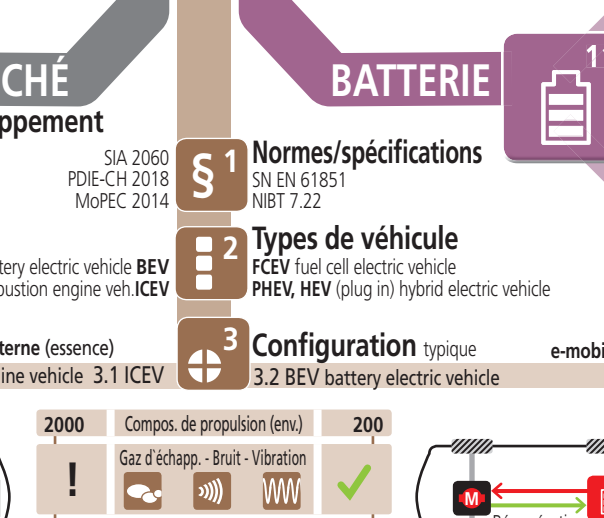
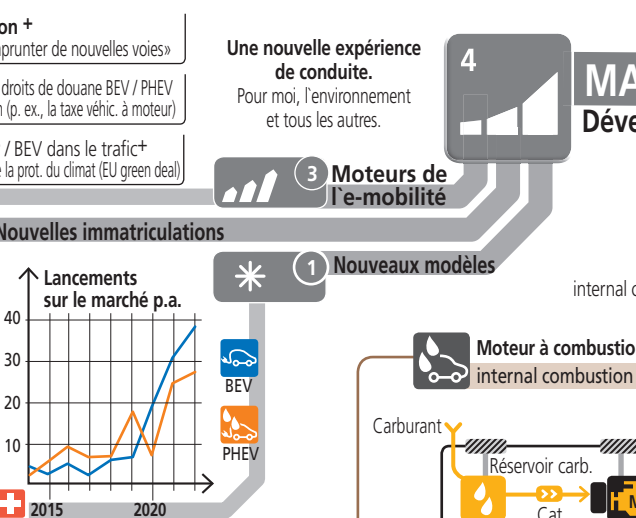
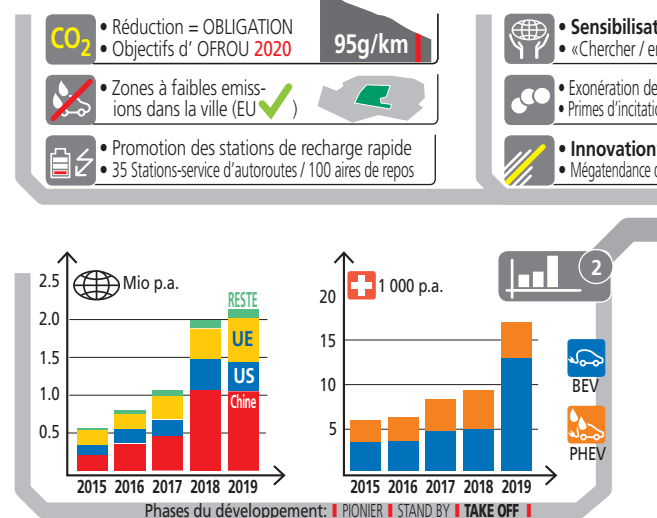
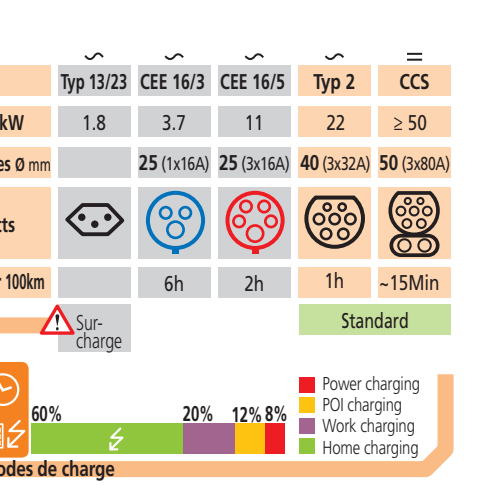
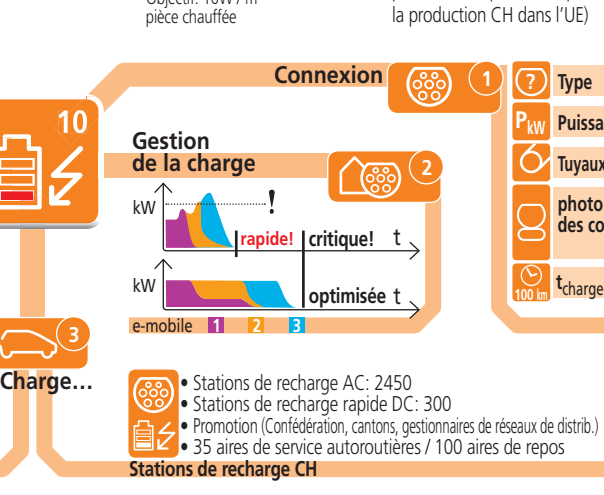
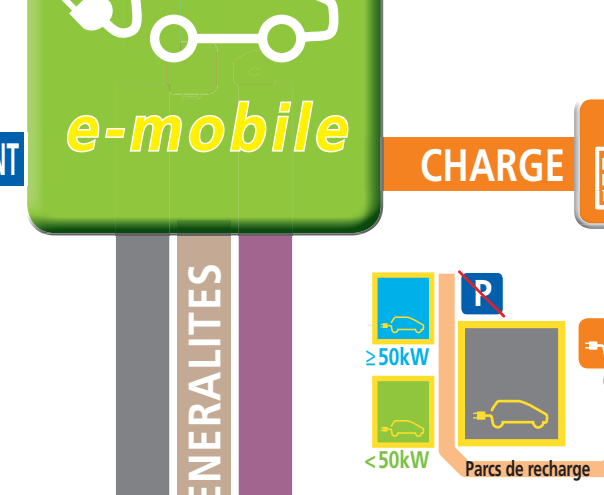
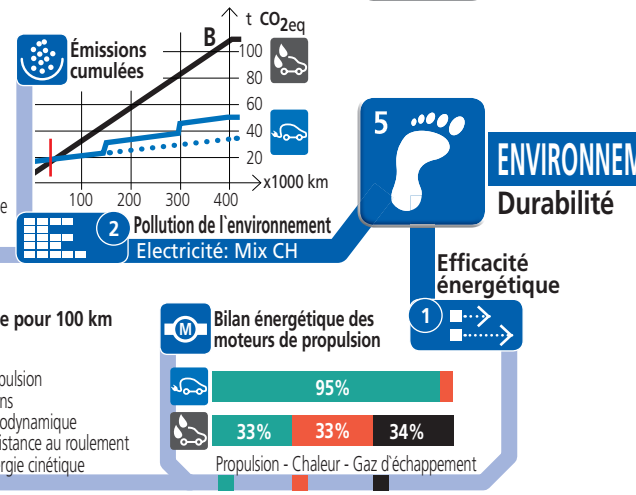
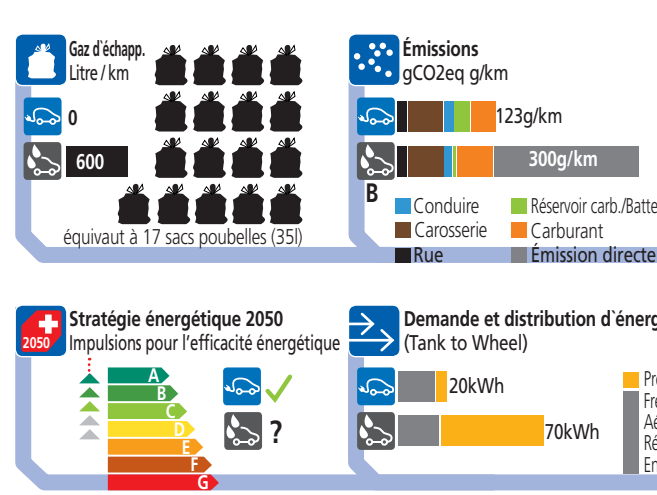
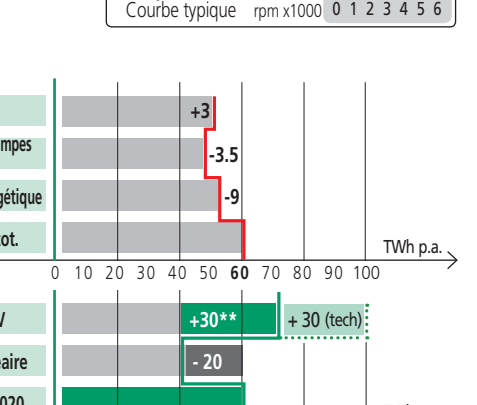
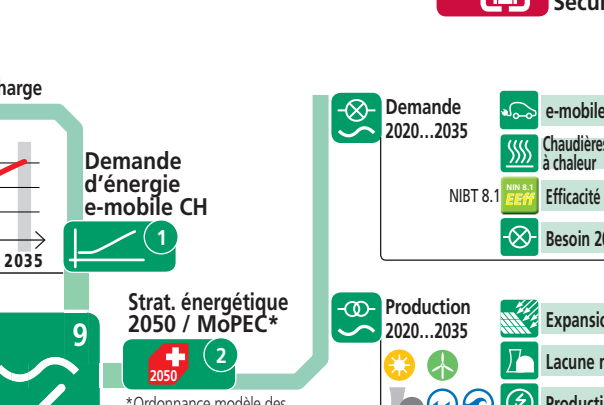
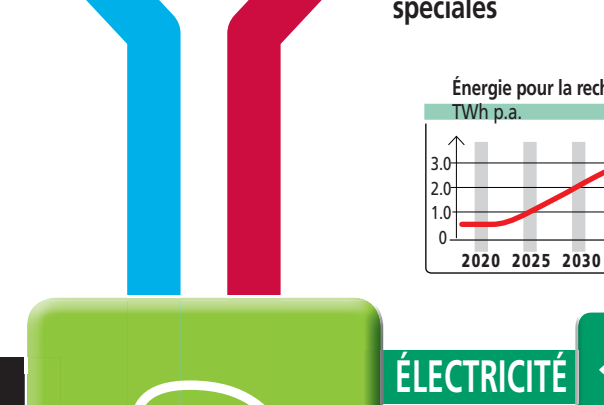
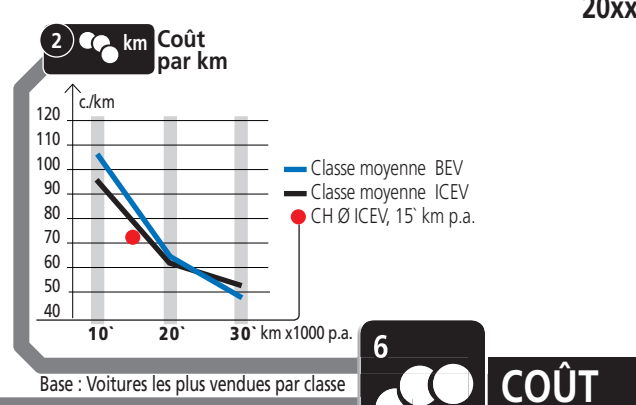
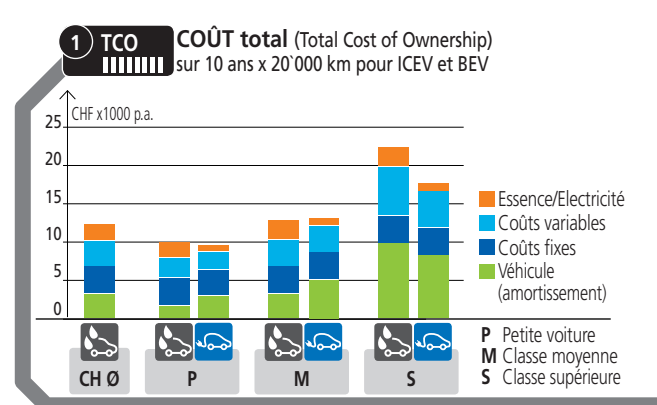
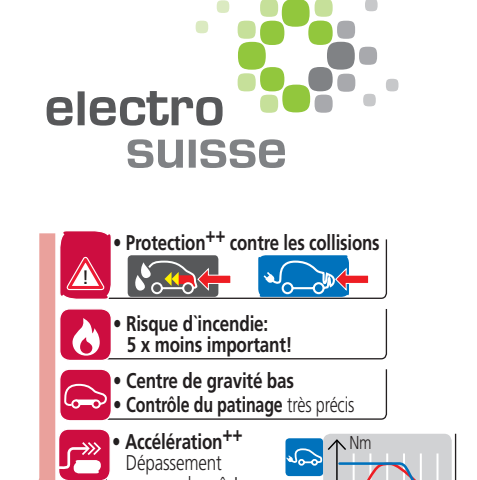
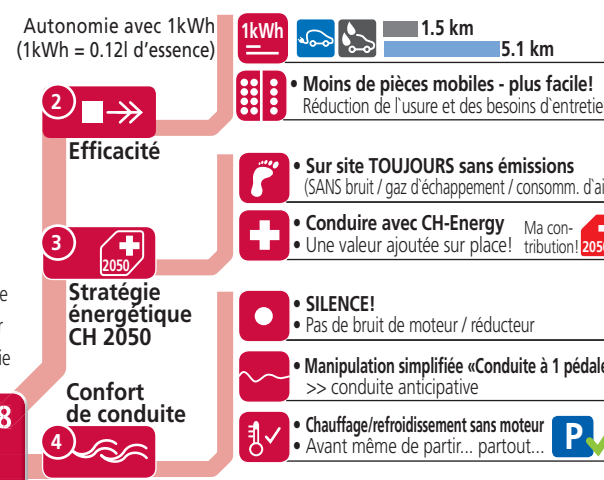
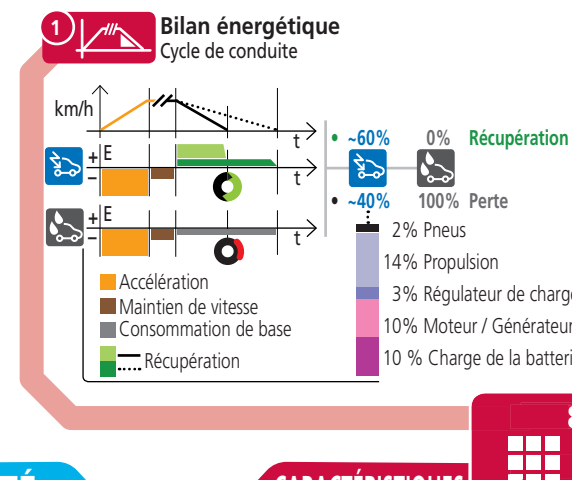
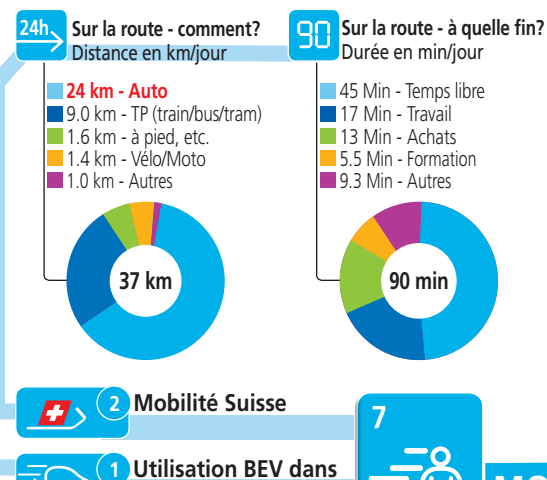
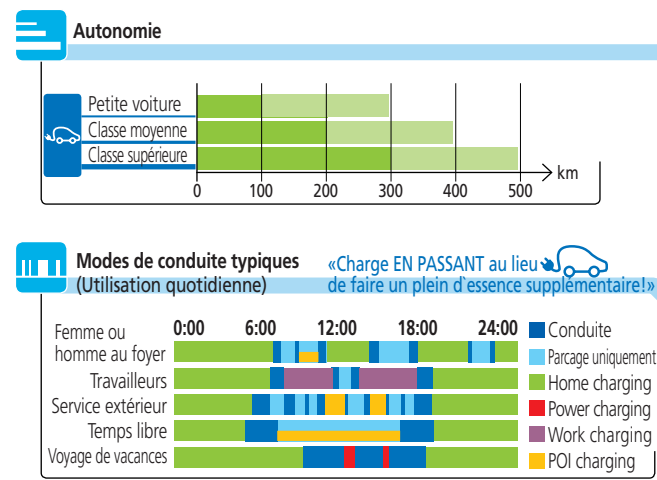


La mobilité électrique – la propulsion de demain





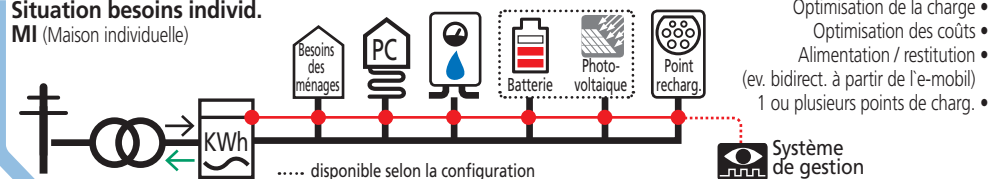
24h 1. Kilométrage: 50 km / jour
15 000 km / an

2. Demande d'énergie: 9...15 kWh / jour
pour 100 km 15...20 kWh

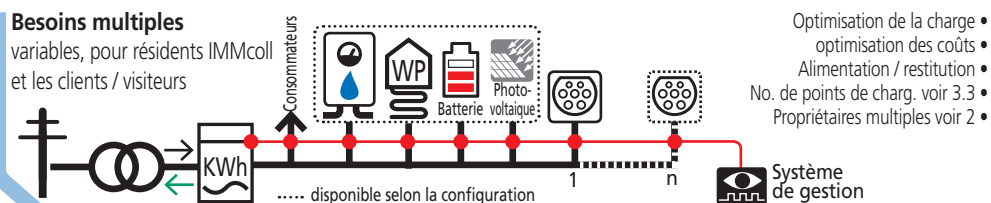
3. t charge - 20...40 min. cap. charge 22 kW
- 50...80 min. cap. charge 11 kW

P 4. Temps d'arrêt typique (à la maison) ~ 12h

Situation besoins individ. MI (Maison individuelle)



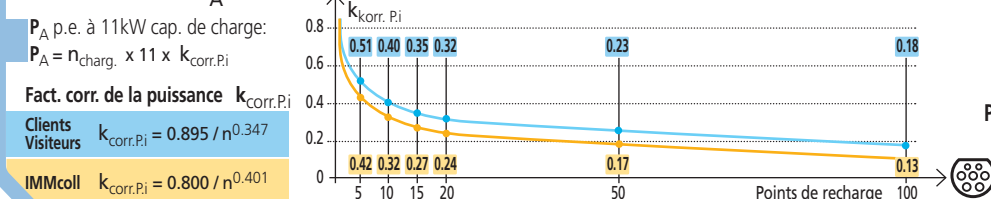
Besoins multiples variables, pour résidents IMMcoll et les clients / visiteurs



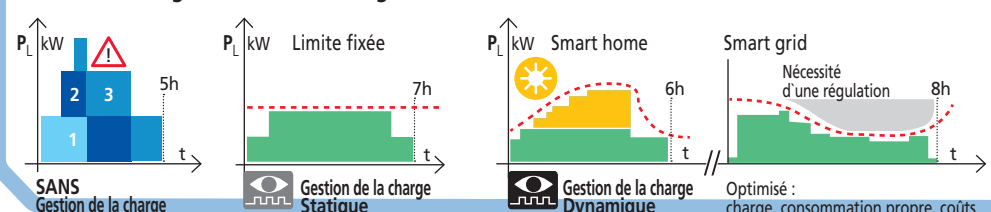
Degré d'expans. pour les étapes d'expans. 1,2 en % pour résidents d'immeubles collectifs et clients / visiteurs



Dimensionnement P_A kW



Courbes de charge en fonction de la gestion et de l'offre de services



- Commande des centrales électriques
- Puissance 11 ou 22 kW
- Factur.: compteur par raccordement
- Gestion de la charge sans - statique - dynamique
- Compensation de la phase dynamique
- Propriétés des stations de recharge
- Coûts supplément. (LAN, DL, ABO...)
- ...

BEV Battery Electric Vehicle
FCEV Fuel Cell Electric Vehicle
ICEV Internal Combustion Engine Vehicle (petrol / diesel / gas)
PHEV Plug in Hybrid Electric Vehicle
HEV Hybrid Electric Vehicle
CO_{2eq} Équivalent en dioxyde de carbone
MoPEC 2014 Modèle de prescriptions énergétiques des cantons
NIBT 7.22 Alimentation électrique pour les véhicules électriques
POI Point of interest (destination)
SIA 2060 Infrastructure pour véhicules électriques dans les bâtiments
SNEN 61851 Équipement électrique des véhicules routiers électriques
PDIE-CH 2018 Prescriptions des distributeurs d'électricité

Organisation

Auto Suisse
OFROU Office fédéral des routes
OFEN Office fédéral de l'énergie
OFS Office fédéral de la statistique
BFH Berner Fachhochschule
ETH Eidg. Tech. Hochschule ZH
Electrosuisse
e-mobile Suisse
AIE Agence internationale de l'énergie

ISI Fraunhoferinstitut
NFPA National Fire Protection Association
PSI Paul Scherrer Institut
SIA Société suisse des ingénieurs et des architectes
TCS Touring Club Suisse

Electrosuisse
Luppmenstrasse 1 | CH-8320 Fehraltorf | +41 58 595 11 11
info@electrosuisse.ch | www.electrosuisse.ch
Rédaction: Peter Bryner / Christian Frei / Claudio Pfister | Version 15f_070521

Cette artmap® a été développée
avec l'aimable soutien de:

EnFK
Konferenz Kantonal Energiefachstellen
Conférence des services cantonaux de l'énergie
Conferenza dei servizi cantonali dell'energia
Conferenza dals posts spezialisads chantunals d'energia

swissgee

ENERGY STORAGE
E3 DC
A member of Hager Group

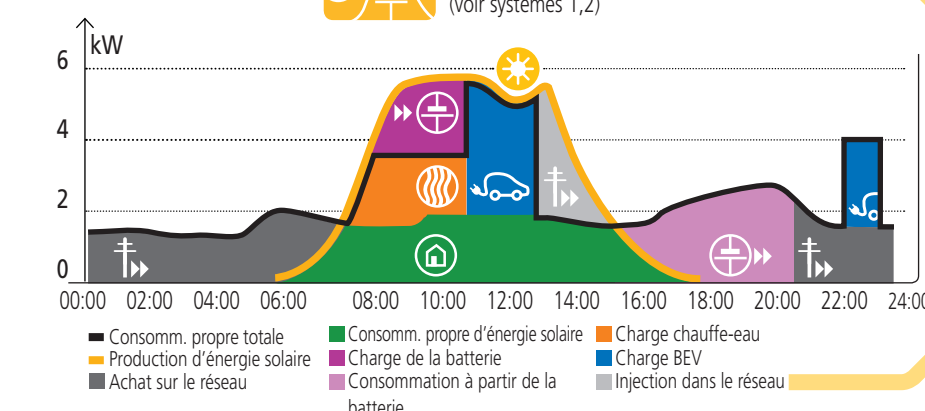
EM

Valeurs de PLANIFICATION

CH • Demande d'énergie
• Charge

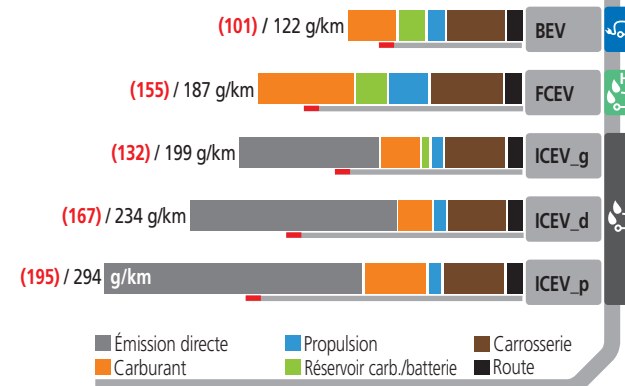
Optimisation locale

Production / consommation

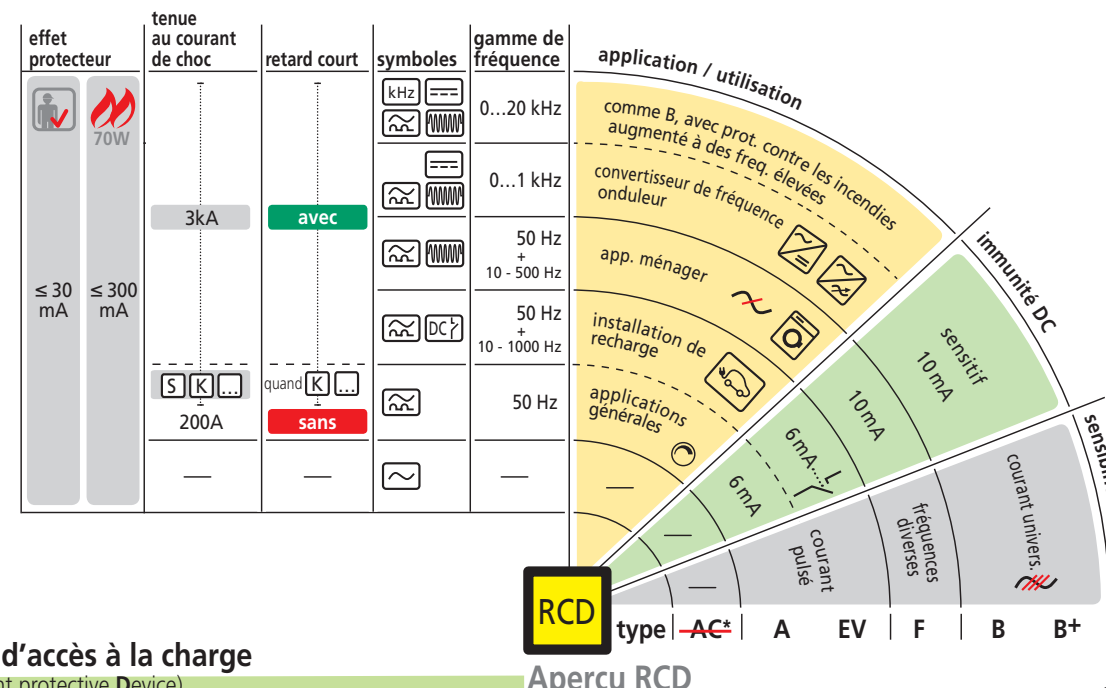


Émissions 2018 / (2040)

La pollution de l'environnement en gCO_{2eq} g/km



Développement typique



8 RCD Protection d'accès à la charge
(Residual Current protective Device)

Aperçu RCD

L'artmap® e-mobile expliquée dans cette brochure a été élaborée en termes de contenu par les auteurs Peter Bryner, Christian Frei et Claudio Pfister et réalisée par ergocom® et Claudius Bohrer. Elle traite une thématique plus que jamais d'actualité: la mobilité électrique. Les artmaps® d'Electrosuisse se distinguent par leur représentation graphique de contenus complexes illustrés sur un maximum de deux feuilles A3. Sont déjà parues dans cette série :

Titre des maps	Nom	Année	Auteur
NIBT 2000	Norme sur les installations à basse tension	1999	P. Bryner J. Schmucki
NIBT 2005	Norme sur les installations à basse tension	2004	P. Bryner J. Schmucki
NIN 2010	Norme sur les installations à basse tension	2009	P. Bryner J. Schmucki
NIBT 2015	Norme sur les installations à basse tension	2014	P. Bryner J. Schmucki
NIBT 2020	Norme sur les installations à basse tension	2019	P. Bryner J. Schmucki
OIBT 2001	Ordonnance sur les installations à basse tension	2001	P. Bryner M. Wey
OIBT 2018	Ordonnance sur les installations à basse tension	2018	P. Bryner M. Wey
EA EN 61439-1	Ensemble d'appareillage à basse tension	2014	P. Bryner M. Schellenberg
Normes	Bases légales et règles techniques pour les installations électriques	2017	M. Schellenberg
Mesures	Mesurer juste dans les installations à basse tension	2017	P. Bryner U. Schmid
Effe	Efficacité énergétique des installations à basse tension	2019	P. Bryner V. Wouters
e-mobile	E-mobilité – Une vue d'ensemble	2020	P. Bryner C. Frei C. Pfister

Partenaire



Edition 2021

Auteur : Peter Bryner
Coauteurs : Christian Frei | Claudio Pfister

Référence

Electrosuisse | Luppmenstrasse 1 | 8320 Fehraltorf
T +41 58 595 11 90 | normenverkauf@electrosuisse.ch

Les documents ont fait l'objet d'un examen approfondi sur la base des normes en vigueur. Les auteurs déclinent toute responsabilité quant aux éventuelles erreurs. En cas de doute, les normes correspondantes s'appliquent.

ISBN : 978-3-907255-09-4

Sommaire

Préface	7
1. Normes / Spécifications	9
2. Types de véhicule	11
2.1. Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)	11
2.2. Battery Electric Vehicle (BEV)	11
2.3. Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)	11
2.4. (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle (PHEV, HEV)	11
3. Configuration typique	13
3.1. Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV), moteur à combustion	13
3.1.1. Fonctionnement du moteur à combustion	13
3.1.2. Gaz d'échappement	13
3.1.3. Bruits	14
3.2. Battery Electric Vehicle (BEV), véhicule électrique	14
3.2.1. Fonctionnement du véhicule électrique	15
3.2.2. BEV à faibles émissions à l'échelle locale	15
3.3. Types de propulsion en 1900	16
4. Marché / Développement	18
4.1. Nouveaux modèles / Nouvelles immatriculations	18
4.2. Moteurs de l'e-mobilité	21
4.2.1. Zones à faibles émissions en milieu urbain (UE)	22
4.2.2. Promotion des stations de recharge rapide (SRR)	23
5. Environnement / Durabilité	25
5.1. Efficacité énergétique	25
5.1.1. Stratégie énergétique 2050 – Impulsions pour l'efficacité énergétique	25
5.1.2. Besoins en énergie et répartition pour 100 km (tank-to-wheel)	27
5.1.3. Bilan énergétique des moteurs de propulsion	29
5.2. Impact environnemental	30
5.2.1. Gaz d'échappement	31

5.2.2. Émissions (de gaz à effet de serre, outil de mesure des nuisances au climat potentielles des véhicules)	32
5.2.3. Émissions cumulées	33
6. Coûts / Efficacité	34
6.1. Coûts totaux (TCO)	34
6.2. Coûts par kilomètre	36
7. Mobilité 20xx	37
7.1. Utilisation quotidienne des BEV	37
7.1.1. Autonomie	37
7.1.2. Modes de conduite typiques (utilisation quotidienne)	39
7.2. La mobilité en Suisse	40
7.2.1. Sur la route – comment ?	40
7.2.2. Sur la route – à quelle fin ?	41
8. Caractéristiques spéciales	42
8.1. Bilan énergétique: cycle de conduite (tank-to-wheel)	42
8.2. Efficacité	42
8.2.1. Rendement	42
8.2.2. Composants de propulsion	42
8.3. Stratégie énergétique CH 2050	42
8.3.1. Sur site TOUJOURS sans émissions: Sans bruit, gaz d'échappement ni consommation d'air	42
8.3.2. Conduire avec CH-Energy – Une valeur ajoutée sur place	42
8.4. Confort de conduite	43
8.4.1. Silence: pas de bruit de moteur et de boîte de vitesses	43
8.4.2. Manipulation simplifiée: «Conduite à une pédale» et conduite anticipative	45
8.4.3. Chauffage/refroidissement sans moteur – Avant même de partir... partout...	46
8.5. Sécurité	47
8.5.1. Protection contre les collisions	48
8.5.2. Risque d'incendie 5 x moins important	48
8.5.3. Centre de gravité bas – Contrôle du patinage très précis	49
8.5.4. Accélération (dépassement encore plus sûr) – Couple (courbe typique)	49

9. Electricité / Fourniture	50
9.1. Demande d'énergie e-mobile CH	50
9.2. Stratégie énergétique 2050 / MoPEC	51
9.2.1. Demande 2020 ... 2035	52
9.2.2. Production 2020 ... 2035	54
10. Charge	57
10.1. Connexion	58
10.2. Gestion de la charge	61
10.3. Charge	63
10.3.1. Parcs de recharge	64
10.3.2. Stations de recharge CH (voir également le point 4.3.3.)	65
11. Batterie	68
11.1. Production	68
11.1.1. Mix de matériaux	68
11.1.2. Réserves de lithium	69
11.1.3. Valeurs de production	69
11.1.4. Densité énergétique / Coûts des batteries	70
11.2. Exploitation	71
11.2.1. Utilisations / Evolution des capacités	71
11.2.2. Caractéristiques spéciales	72
12. Glossaire	73
13. Spécifications	75

Préface

Terminé le pistolet, place à la prise électrique. Ce qui paraît simple n'est rien de moins qu'une révolution dans le domaine des transports tel que nous le connaissons depuis plus de 125 ans.

ABB Suisse (2018)

Le gagnant doit être «simple, bon marché et efficace» – ce sera donc le moteur électrique.

(Urs W. Muntwyler, 2020)

La discussion ne porte plus sur la question de savoir si la mobilité électrique propose effectivement une propulsion alternative, elle est bel et bien la propulsion de demain.

Dr. Jörg Beckmann (directeur de l'association Swiss eMobility)

Les mouvements et les protestations pour le climat initiés par les jeunes à l'échelle mondiale ont trouvé un écho auprès des acteurs politiques, lesquels élèvent de plus en plus la voix pour exiger une intensification des actions de lutte contre le changement climatique. Un quart des émissions de gaz à effet de serre produites en Europe sont dues aux transports. Ce secteur est le plus énergivore dans toute la Suisse et la tendance continue de présenter une trajectoire ascendante. Le transport individuel motorisé constitue la principale source de consommation et provoque environ 70 % des émissions de CO₂ nuisibles au climat dans le secteur de la mobilité. Par conséquent, il demeure particulièrement urgent de répondre aux besoins exprimés en termes de concepts de mobilité durables et de solutions techniques appropriées. Un consensus se dégage parmi les experts: seule une électrification considérable de la propulsion automobile permettra de décarboner la mobilité sur le long terme.

Les véhicules électriques apparaissent dès le XIX^e siècle déjà. Leurs débuts remontent à ceux de l'histoire de l'automobile. La première voiture électrique fut construite en 1837 à Aberdeen (Écosse).

En 1881, le Français Gustave Trouvé inventa le premier véritable véhicule électrique, qui était un tricycle. Construite par Andreas Flocken, la toute première voiture à propulsion uniquement électrique équipée de quatre roues fut lancée sur le marché en 1888. Cette technologie connut un tel succès que même des taxis alimentés par batterie circulaient à Londres et New York à la fin du XIX^e siècle. Le reste de l'histoire tient en quelques mots, la baisse du prix de l'essence et l'autonomie nettement supérieure des véhicules consommant une énergie fossile ont permis à ces derniers de poursuivre leur marche triomphale qui avait débuté avec l'automobile à moteur à combustion développée par Carl Benz en 1885.

Près d'un siècle de mobilité fossile plus tard, la mobilité électrique lança une course-poursuite. La hausse du prix de l'essence, les réglementations plus strictes en matière de protection de l'environnement et la conception de nouvelles batteries exigent un changement d'approche. Cette situation profite surtout à de nouveaux acteurs comme Tesla, lesquels donnent désormais le ton et font partie du gotha de la branche. Mais les grands constructeurs automobiles suivent eux aussi la voie tracée par l'essor de la mobilité électrique. Depuis les premiers balbutiements agités de la «nouvelle mobilité élec-

trique» en 2003 autour du pionnier Elon Musk, la voiture électrique est passée du statut de signe extérieur de richesse à celui de véhicule abordable et apte à un usage quotidien.

Placées sous le signe de la transition énergétique, de nombreuses décisions importantes prises par la Suisse sur un plan politique envoient un message clair: le remplacement des combustibles et carburants fossiles est inévitable, la mobilité électrique ne va plus disparaître. Le Conseil fédéral a décidé de ramener à zéro les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Concernant les voitures de tourisme, le véhicule à batterie sera l'instrument de choix pour atteindre cet objectif, dicit Christoph Schreyer, responsable de la section Mobilité de l'OFEN. Toute la question est de savoir à quelle vitesse va avancer sa réalisation. Le tempo semble actuellement plus soutenu que beau-

coup de gens ne le pensent. Dix pays européens souhaitent déjà interdire la vente de nouvelles voitures à essence et diesel. Une telle interdiction est censée entrer en vigueur en 2025 en Norvège, en 2030 en Angleterre et en 2035 en Californie. Ce changement s'opérera peut-être même plus rapidement.

En 2019, 98399 véhicules hybrides et 28716 véhicules électriques étaient immatriculés en Suisse. Ils restent donc inférieurs en nombre. Mais leurs ventes augmentent à une vitesse fulgurante. Selon une enquête représentative menée par AXA, un tiers des conducteurs suisses pourraient envisager d'acheter prochainement une voiture électrique. D'après une autre enquête, les propriétaires d'un véhicule électrique ne souhaitent plus revenir à un véhicule à énergie fossile.

1. Normes / Spécifications

Les normes, les directives et les standards ouvrent le marché à la mobilité électrique et préparent la voie à son développement rapide, ainsi qu'à un concept de mobilité grand public. Elles posent les fondations de la mise en œuvre d'innovations futures dans ce domaine.

L'artmap® présente un aperçu des normes et spécifications majeures concernant l'infrastructure de recharge pour véhicules électriques laquelle se compose de l'installation électrique, du système de recharge et de la station de recharge proprement dite.

SN 411000

Norme sur les installations à basse tension (NIBT)
Chap. 7.22 Alimentation des véhicules électriques

SIA 2060

Infrastructure pour véhicules électriques dans les bâtiments

PDIE 2018

Prescriptions des distributeurs d'électricité CH. Conditions techniques de raccordement (CTR) relatives au raccordement des installations de consommateurs, de production d'énergie et de stockage sur le réseau de distribution basse tension

MoPEC 2014

Modèle de prescriptions énergétiques des cantons

SN EN 61851

Système de charge conductive pour véhicules électriques (série de normes)

Alors que l'utilisation d'un lave-vaisselle ne requiert l'application d'aucune mesure particulière,

SIA 2060
PDIE-CH 2018
MoPEC 2014



Normes/spécifications

SN EN 61851
NIBT 7.22

la recharge d'un véhicule électrique exige quant à elle de prendre en considération les conditions spécifiques du processus de charge. À la différence des récepteurs domestiques de forte puissance (chauffe-eau, four, cuisinière, pompe à chaleur, ascenseur, etc.), le véhicule électrique appelle une puissance (très) importante durant plusieurs heures pendant sa recharge.

S'agissant de l'**installation électrique**, le chapitre 7.22 de la NIBT constitue la source de référence depuis 2015. L'installation électrique désigne l'installation dans le bâtiment jusqu'à la prise ou jusqu'au raccordement fixe de la station de recharge. La sécurité électrique, les effets des champs électromagnétiques, la compatibilité électromagnétique (CEM), les dangers mécaniques et les exigences environnementales constituent les axes essentiels de la NIBT.

Les **systèmes de charge** ne peuvent être mis en circulation que dans la mesure où, lors de la recharge par câble d'un véhicule électrique les exigences en matière de sécurité et de santé fixées par les prescriptions suivantes seront respectées.

RS 734.26

Ordonnance sur les matériels électriques à basse tension (OMBT)

RS 734.27

Ordonnance sur les installations électriques à basse tension (OIBT)

RS 734.5

Ordonnance sur la compatibilité électromagnétique (OCEM)

Figure 1.1 : Normes et spécifications

RS 814.81

Ordonnance sur la réduction des risques liés
aux produits chimiques (ORRChim)

La norme **CEI 61439-7** «Ensembles d'appareillage à basse tension – Partie 7: Ensembles pour installations publiques particulières telles que les marinas, les terrains de camping, les marchés et les emplacements analogues et pour bornes de charge de véhicules électriques» réglemente la **station de recharge**, laquelle constitue un matériel.

2. Types de véhicule



Les véhicules se classent généralement en deux catégories principales en fonction de leur type de propulsion : les propulsions conventionnelles (ICEV) et les propulsions alternatives (BEV, FCEV, HEV, PHEV).

2.1. Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV)

Les véhicules conventionnels sont propulsés par un moteur à combustion, à savoir un moteur Otto (avec dispositif d'allumage) ou un moteur diesel (sans dispositif d'allumage) dans la plupart des cas. Les carburants inflammables comme l'essence, le gazole ou le gaz naturel sont transformés en énergie mécanique. De nos jours, les carburants alternatifs d'origine biogène (biogaz, biogazole, bioéthanol) ou synthétique (hydrogène, méthanol, etc.) sont également capables d'alimenter partiellement en énergie des propulsions conventionnelles. Les véhicules à essence existent depuis les débuts de la construction automobile, c'est à dire depuis 1886, année où Carl Benz fit breveter la première automobile.

2.2. Battery Electric Vehicle (BEV)

Les véhicules (électriques) à batterie sont des véhicules à propulsion uniquement électrique dont le moteur électrique entraîne les roues. S'agissant des modèles actuels, l'électricité provient le plus souvent d'une batterie lithium-ion, rechargée au moyen d'une source de courant externe. En outre, les véhicules BEV disposent d'un mécanisme de récupération. Ainsi, le moteur électrique fonctionne en génératrice et transforme l'énergie cinétique en énergie électrique à chaque ralentissement ou freinage. Cette énergie électrique est d'abord stockée dans la batterie avant d'être ultérieurement réutilisée à des fins de propulsion.

Dans le langage courant, le terme «véhicules

électriques» est considéré en premier lieu comme synonyme de véhicule électrique à batterie. En revanche, les véhicules hybrides ne sont pas des véhicules électriques.

À l'instar des véhicules à moteur à combustion, les débuts des véhicules électriques remontent aux années 80 du XIX^e siècle. La toute première voiture électrique fut lancée sur le marché en 1888 par Andreas Flocken.

2.3. Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)

Les véhicules à pile à combustible (voitures à hydrogène) appartiennent également à la catégorie des véhicules électriques. À la différence des véhicules BEV, l'énergie électrique qui entraîne le moteur électrique ne provient pas d'une batterie, mais d'une pile à combustible. C'est à l'intérieur de celle-ci que l'électricité est produite à partir de l'oxygène présent dans l'air et de l'hydrogène ravitaillée dans le véhicule. Le courant généré entraîne alors le moteur électrique. Les véhicules FCEV et BEV appartiennent à la catégorie des véhicules silencieux.

2.4. (Plug-in) Hybrid Electric Vehicle (PHEV, HEV)

a) Véhicules hybrides (HEV)

Le mot «hybride», qui vient du latin désigne un organisme «issu de deux espèces ou variétés différentes» ou un ensemble «composé d'éléments de différentes natures». Les véhicules hybrides disposent de deux types de propulsion. Ils combinent le moteur électrique et le moteur à combustion lequel fonctionne généralement à l'essence. Le gazole et le gaz naturel eux aussi, sont des carburants.

La combinaison de ces deux types de moteur a pour but non seulement de réunir les avantages spécifiques des deux types de propulsion, mais aussi de compenser leurs inconvé-

Figure 2.1 : Types de véhicule

nients. Une propulsion hybride choisit le moteur qui consomme le moins d'énergie pendant la conduite. Ainsi, ce mode de propulsion se traduit par une plus grande autonomie par «plein» d'essence, de diesel ou de gaz naturel.

Une batterie à bord sert de système de stockage de courte durée aux véhicules hybrides classiques qui, à la différence des véhicules hybrides rechargeables (plug-in), ne sont pas rechargés au moyen de sources de courant externes. Autrement dit, l'énergie motrice totale est générée par la combustion de l'essence, du gazole ou du gaz naturel. Toutefois, la batterie permet d'utiliser un moteur à combustion de plus petite taille qui de plus pourra tourner avec une efficacité supérieure.

Dans le cas de l'hybride parallèle, les deux moteurs agissent sur les roues. La récupération de l'énergie de freinage permet de recharger les batteries. S'agissant de l'hybride série, les roues ne sont entraînées que par un seul moteur, à savoir le moteur électrique en règle générale. Au cours de ce processus, le moteur à combustion entraîne un générateur, qui alimente le moteur électrique en électricité ou recharge les batteries.

Les véhicules hybrides existent depuis plus de 120 ans. Le principe de la propulsion hybride a été inventé en 1899 par le Suisse Marc Birkigt.

b) Véhicules hybrides plug-in (PHEV)

L'hybride plug-in ou hybride à prise, constitue une version perfectionnée de l'hybride série, dont les batteries peuvent être rechargées de trois façons :

I. via le moteur à combustion, à l'instar du véhicule hybride

II. via une borne de recharge ou une prise, à l'instar du véhicule électrique

III. via le mécanisme de récupération (récupération de l'énergie de freinage), à l'instar du véhicule hybride et électrique

Dans le cas des véhicules hybrides plug-in, un moteur à combustion et/ou un moteur électrique entraîne les roues. À la différence du véhicule hybride, la batterie peut être rechargée par une source de courant externe fournissant l'électricité au moteur électrique. Si la batterie est vide (ou si une puissance élevée est appelée), alors un petit moteur à combustion intervient (moteur d'appoint) jusqu'à ce que la batterie puisse être à nouveau rechargée sur une borne ou sur une prise. Étant donné que les batteries des véhicules hybrides plug-in sont généralement plus grandes que celles des véhicules hybrides, elles permettent de parcourir des distances plus importantes avec une propulsion uniquement électrique.

3. Configuration typique

3.1. Internal Combustion Engine Vehicle (ICEV), moteur à combustion

3.1.1. Fonctionnement du moteur à combustion

En technologie automobile, tous les composants qui génèrent la puissance de propulsion sur le véhicule et la transmettent sur les routes, constituent le groupe motopropulseur. Constitué de quelque 2000 composants, le groupe motopropulseur conventionnel d'un ICEV comprend le moteur Otto ou diesel avec le volant d'inertie, l'embrayage avec la boîte de vitesses, les roues et, quel que soit le modèle, des différentiels, arbres de transmission et joints.

Dans un moteur à combustion à quatre temps, un mélange de carburant et d'air est aspiré dans un cylindre (premier temps). Dans le cas d'un véhicule à essence, ce mélange est ensuite enflammé par l'étincelle émise par une bougie (deuxième temps). Dans un moteur diesel, un autoallumage du mélange de gazole et d'air a lieu dès que la pression est suffisamment élevée. Le troisième temps est celui de la combustion du mélange de carburant et d'air. La pression générée par les gaz de combustion provoque le mouvement du piston et de la bielle et entraîne la rotation du vilebrequin. Dans un quatrième et dernier temps, le piston chasse les gaz brûlés du cylindre par le pot d'échappement et les rejette dans l'environnement.

3.1.2. Gaz d'échappement

Les gaz d'échappement des moteurs à combustion se composent d'azote (N_2), de dioxyde de carbone (CO_2), de vapeur d'eau (H_2O) et des polluants toxiques suivants : le monoxyde de carbone (CO), l'hydrocarbure (HC), l'oxyde d'azote (NOX), le dioxyde de soufre (SO_2) et les particules de suie (PM). Ces dernières sont principalement produites par les moteurs diesel. La

composition qualitative et quantitative des gaz d'échappement dépend de plusieurs facteurs : les combustibles utilisés, le type et l'âge du moteur, les réglages techniques effectués sur celui-ci et sa maintenance, l'épurateur des gaz d'échappement et l'usage fait de la voiture.

La circulation routière génère des poussières fines causées par l'abrasion des pneus et des freins, par les poussières remises en suspension et par les gaz d'échappement, et notamment par ceux rejetés par les véhicules diesel non filtrés. Les particules de poussières fines n'étant que partiellement filtrées par le corps humain, elles peuvent pénétrer dans les alvéoles pulmonaires et entraîner des maladies respiratoires ou cardiovasculaires, ainsi que des cancers.

Les oxydes d'azote irritent les organes respiratoires et leur sont nuisibles. Leurs concentrations accrues dans l'air ont chez l'enfant et l'adulte un effet néfaste sur la fonction pulmonaire. Elles sont aussi dans une large mesure co-responsables de la formation des pluies acides. La présence d'oxydes d'azote dans l'atmosphère est principalement causée par les gaz d'échappement produits lors de la combustion de combustibles fossiles.

Les catalyseurs font partie intégrante du post-traitement des gaz d'échappement des moteurs Otto et diesel, dont les gaz de combustion toxiques sont épurés au moyen d'un processus chimico-mécanique une fois qu'ils ont quitté le cylindre. Les catalyseurs conçus aux États-Unis dans les années 1970 ont contribué à une baisse considérable des émissions des ICEV car ils ont notamment permis de réduire la part d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone et d'oxydes d'azote dans les gaz d'échappement. À cela est venue s'ajouter la limitation de certains composants des carburants comme le

soufre et le plomb. Cette mesure a permis de rendre les gaz d'échappement moins nuisibles à l'environnement. Afin d'obtenir un fonctionnement impeccable du catalyseur automobile, il est indispensable d'effectuer le ravitaillement avec de l'essence sans plomb.

Les prescriptions nationales et internationales sur les émissions et les immissions sont continuellement renforcées, ce qui rend indispensables une optimisation technique des moteurs à combustion et un post-traitement complexe des gaz d'échappement, afin de remplir les critères relatifs aux valeurs limites. En vertu de la loi fédérale sur la protection de l'environnement, l'ordonnance sur la protection de l'air stipule que les cantons doivent veiller à «protéger l'homme, les animaux et les plantes, leurs biotopes et biocénoses, ainsi que le sol, des pollutions atmosphériques nuisibles ou incommodes.» (art. 1; OPair). En outre, le 1^{er} septembre 2019 a été une date clé pour la protection de l'air en Suisse. C'est à partir de ce jour que les conditions d'immatriculation durcies sont entrées en vigueur pour les voitures. Depuis cette date, les véhicules importés en Suisse et nouvellement immatriculés sont tenus de satisfaire au moins à la norme sur les gaz d'échappement Euro 6d-TEMP. Les véhicules diesel (voitures neuves) doivent donc disposer d'un système d'injection d'urée et de catalyseurs SCR réduisant fortement les émissions d'oxydes d'azote et les véhicules à essence doivent avoir un filtre à particules. Dès le 1^{er} janvier 2020, la norme plus stricte Euro 6d a été introduite. Celle-ci est depuis le 1^{er} janvier 2021 obligatoire pour toutes les voitures neuves.

Source: NZZ, 29.08.2019 | ADAC, Dieselfahrverbot oder Umweltzone? Der Unterschied, 28.01.2019

3.1.3. Bruits

La circulation routière constitue la plus grande source de bruit dans toute la Suisse. D'après le site laerm.ch, 20 % de la population de notre pays est exposée à un bruit routier excessif sur le lieu de son domicile. Les revêtements de route peu bruyants, la réduction de la vitesse, un comportement de conduite respectueux, l'entretien des véhicules et les innovations techniques qui leur sont apportées, permettent de contenir le bruit routier.

Les émissions sonores des véhicules à moteur se composent comme suit :

1. le bruit du moteur
2. le bruit de roulement
3. le bruit causé par le vent

Applicable aussi en Suisse depuis 2016, le règlement européen n° 540/2014 fixe les valeurs limites des émissions sonores des véhicules à moteur, lesquelles doivent continuer de baisser d'ici 2026.

3.2. Battery Electric Vehicle (BEV), véhicule électrique

À la différence des véhicules à moteur à combustion, les véhicules à propulsion uniquement électrique (BEV) sont eux équipés d'un groupe motopropulseur nettement plus efficace, qui comprend quelque 200 composants environ et présente donc une structure dix fois moins complexe que celle des ICEV. Des pièces essentielles comme la boîte de vitesses et l'embrayage ne sont pas requis pour le véhicule électrique, lequel a pour principales composantes :

- le moteur électrique
- la batterie de traction (batterie à haut voltage)
- l'électronique de puissance
- la batterie de bord (batterie à bas voltage)
- la borne de charge

3.2.1. Fonctionnement du véhicule électrique

Dans un système à propulsion électrique, le moteur électrique transforme en énergie mécanique l'énergie électrique stockée dans la batterie. Il existe divers types de moteurs électriques pour les voitures électriques. À l'heure actuelle, les moteurs triphasés synchrones (PSM/FSM) sont les types les plus fréquemment montés. Les moteurs asynchrones (ASM) sont eux ponctuellement sollicités, surtout dans la classe supérieure avec des moteurs puissants. Les moteurs électriques se composent d'une contre-partie magnétique mobile : le rotor. Dans le cas du moteur synchrone à excitation permanente (PSM), le rotor produit un champ magnétique constant au moyen d'aimants permanents. S'agissant du moteur synchrone à excitation séparée (FSM), ce champ magnétique est généré de façon temporaire par le courant continu circulant dans les enroulements électriques. Le stator crée pour sa part un champ magnétique tournant au moyen du courant triphasé. Les champs magnétiques du rotor et du stator s'attirent l'un l'autre à tour de rôle et se repoussent. Le rotor tourne et met les roues et le véhicule en mouvement.

La voiture à propulsion uniquement électrique (BEV) est entraînée par un moteur électrique (convertisseur d'énergie) qui tire son énergie d'un système de stockage électriquement rechargeable, à savoir la batterie de traction. Celle-ci est comparable au réservoir d'un ICEV conventionnel, et constitue le composant le plus onéreux d'un véhicule électrique, lequel représente entre 15 % et 30 % de sa valeur. À l'heure actuelle, les batteries lithium-ion sont les plus utilisées. Elles se distinguent par leur longévité et par la rapidité de leur recharge. De plus, elles sont capables de stocker une quantité d'électricité supérieure à celle des batteries

présentant une autre composition. La batterie doit être rechargée à intervalles réguliers et sa capacité détermine l'autonomie du véhicule. La batterie de traction se recharge sur une source externe comme une station de recharge publique ou privée, une borne Wallbox ou une prise, via le réseau électrique.

Par ailleurs, la transformation du courant provenant de la batterie en un courant présentant une forme, une intensité et une fréquence appropriées au moteur électrique est assurée par l'électronique de puissance.

Comme pour toutes les voitures, une deuxième batterie dite de bord (en règle générale une batterie au plomb de 12 V), qui prend en charge l'approvisionnement en énergie de l'électronique de bord, est disponible en plus de la batterie de traction. Parmi les équipements de l'électronique de bord figurent notamment la radio, l'éclairage, les essuie-glaces et le régulateur de vitesse.

La fiche d'un véhicule électrique est le moyen de raccordement qui permet de charger dans le véhicule le courant issu du réseau. À l'instar du bouchon de réservoir des ICEV, un clapet est posé sur une aile du véhicule. Sur certains modèles il est en revanche situé à l'avant ou à l'arrière.

3.2.2. BEV à faibles émissions à l'échelle locale

S'agissant de la conduite, les BEV produisent généralement de faibles émissions à l'échelle locale étant donné qu'ils sont équipés d'un moteur électrique silencieux et sans vibrations, qui ne génère aucun gaz d'échappement. À la différence des ICEV, les véhicules électriques ne sont pas propulsés par un moteur à combustion. Comme ils ne rejettent aucune émission

nuisible au climat (oxydes d'azote, etc.) générant un smog estival, un ozone proche du sol et des poussières fines pendant la conduite, ils apportent une contribution importante à l'amélioration de l'hygiène de l'air et à la promotion d'un trafic plus respectueux du climat. C'est la raison pour laquelle SuisseEnergie en arrive, dans sa brochure «Véhicules à haute efficacité énergétique. Tendances du marché 2019», à la conclusion suivante: «La mobilité électrique est une technologie clé pour la réduction nécessaire et urgente des gaz à effet de serre émis par la circulation.»

Il est vrai que les voitures électriques produisent moins de poussières fines que les ICEV. Toutefois, l'abrasion de leurs pneus et, à un degré moindre, de leurs freins contribue également à la pollution due aux particules fines sous forme de poussières et de microplastiques, et ce, au même titre que les véhicules conventionnels. L'abrasion des pneus des véhicules figure parmi les principales causes de la présence de microplastiques dans l'environnement. Plusieurs chercheurs ont élaboré pour les véhicules un procédé qui empêche les émissions causées par les pneus et les freins d'être rejetées dans l'environnement. Pour ce faire, ils tirent parti de la charge électrostatique des particules des poussières et de celle des particules de plastique. Il est à noter que, contrairement aux moteurs Otto à injection directe, les véhicules électriques ne produisent pas de particules de poussières ultra-fines et donc très nuisibles à la santé.

Les véhicules électriques ne sont silencieux qu'à des vitesses allant jusqu'à 35 km/h environ. Si le BEV roule à une vitesse supérieure, alors le bruit du roulement des pneus sur la chaussée prédomine, et ce, quel que soit le type de propulsion. Étant donné que les véhi-

cules à propulsion électrique ou hybride se déplacent en n'émettant pratiquement aucun bruit aux vitesses inférieures à 20 km/h et sont donc susceptibles de présenter un danger potentiel pour la mobilité douce, un système d'avertissement acoustique («Acoustic Vehicle Alerting System» (AVAS)) est depuis juillet 2019 obligatoire dans l'UE et en Suisse pour les en cas de nouvelles immatriculations. Le signal sonore émis doit permettre de reconnaître si le véhicule freine ou accélère.

La question de savoir si le respect de l'environnement local par les BEV doit s'appliquer à tout de leur cycle de vie, c'est-à-dire de leur fabrication à leur élimination en passant par la consommation d'électricité, sera clarifiée au chapitre 5 Environnement / Durabilité.

3.3. Types de propulsion en 1900

La lecture de l'histoire de l'automobile livre des conclusions surprenantes quant à la répartition des types de propulsion des voitures vendues aux États-Unis vers 1900. Au tournant du siècle, 38 % des véhicules vendus fonctionnaient à l'électricité et 40 % étaient des voitures à vapeur. La part relativement faible des ICEV (22 %) tient au fait qu'à cette époque, la propulsion à essence était la plus lente de toutes. Les véhicules à essence présentaient néanmoins l'avantage d'être moins coûteux et plus légers que ceux à vapeur et, comparativement aux BEV, offraient une plus grande autonomie.

La fin provisoire de l'histoire de l'automobile, à savoir la marche triomphale du moteur à combustion, est connue. À partir de 1908, année où la Ford T fut lancée sur le marché, le concept nouvellement introduit de l'assemblage à la chaîne va permettre à la voiture à essence de devenir un produit de grande consommation, qui pourra être proposé à des prix de plus en plus

bas. Le problème longtemps insoluble du manque d'autonomie des véhicules électriques, a certainement favorisé une telle évolution. En outre, une alliance très prospère était établie entre l'industrie du pétrole et les constructeurs de véhicules ICEV. Ce partenariat s'est ensuite traduit par un développement rapide du réseau de stations-service.

Source: Patalong, Frank. Zurück in die Zukunft – Mobilität wie anno 1899. Spiegel Geschichte Edition en ligne, 14.11.2017

4. Marché / Développement

Désormais, les consommateurs se mettent également à bifurquer vers la mobilité électrique. Les chiffres des ventes ne cessent d'augmenter. Dans le cas de certains modèles, il est prévu que dans cinq ans plus d'un quart des ventes concerneront les véhicules à prise – et donc soit les voitures à batterie soit les hybrides plug-in, lesquels combinent moteur à combustion et moteur électrique. L'exemple de la Norvège montre qu'il sera même possible d'accélérer la cadence. Et des analystes estiment que dès 2024 la production de voitures à batterie ne coûtera pas plus chère que celle de voitures équipées d'un moteur à combustion.

4.1. Nouveaux modèles / Nouvelles immatriculations

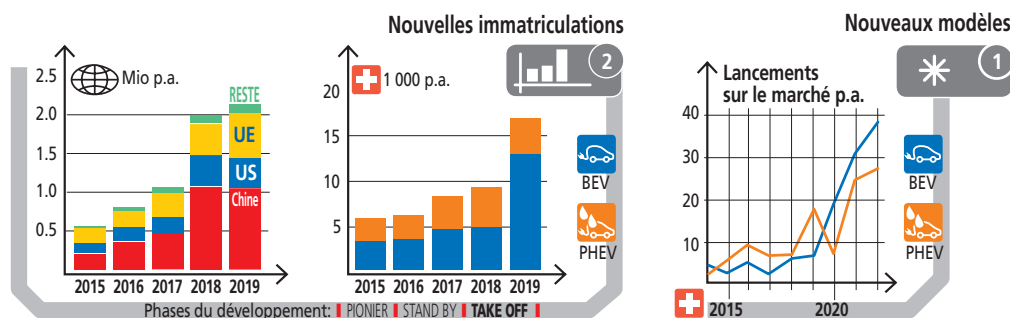
BEV versus PHEV

Si l'on compare les lancements sur le marché des nouveaux modèles de BEV et de PHEV à partir de 2015, une tendance se dégage clairement, qui indique un passage des véhicules électriques hybrides aux véhicules à propulsion uniquement électrique. Le fait que de plus en plus, les véhicules hybrides constituent des modèles de fin de série, se reflète également dans les ventes et les nouvelles immatriculations en Suisse. Le développement fulgurant des BEV est également perceptible dans l'offre disponible sur le marché suisse. La même direction

est prise par la poussée technologique qui a provoqué l'évolution des BEV. Le nombre d'architectures de véhicules conçues tout particulièrement pour des modèles électriques ne cesse de croître. Des batteries plus performantes permettent de proposer des autonomies réelles comprises entre 200 et 400 km ou plus pour les séries haut de gamme. En outre, un nombre sans cesse croissant de véhicules électriques autorisent des puissances de charge allant jusqu'à 150 kW. De plus, les possibilités de recharge continuent de se multiplier.

Les véhicules à batterie ne cessent de gagner en compétitivité en termes de prix étant donné que les coûts pour l'ensemble du cycle de vie sont souvent égaux ou inférieurs à ceux des véhicules à moteur à combustion. Ces coûts pourraient continuer de chuter grâce aux prix d'achat de plus en plus bas pour des batteries, de l'électronique de puissance et des semi-conducteurs. D'après une étude actuelle du TCS, l'autonomie moyenne par charge de batterie n'était encore que de 127 km en 2015. Entre cette date et 2020 elle a plus que doublé, pour atteindre les 331 km. Sur cette période, le prix du véhicule par kilomètre d'autonomie est passé de CHF 343 à CHF 167 et a donc diminué pratiquement de moitié. Selon le TCS, ces chiffres attestent du progrès technologique accompli dans le domaine de la fabrication des

Figure 4.1 : Immatriculations des nouveaux modèles, données mondiales pour les BEV+PHEV



batteries, et de la croissance quantitative en termes de production, laquelle se traduit par une baisse des prix. Moins coûteuse que l'essence ou le gazole, l'électricité constitue le facteur d'économie le plus important. Dans le cas d'une distance parcourue de 15 000 km/an, les coûts d'électricité équivalent en moyenne au tiers de ceux engendrés des deux autres carburants, et s'élèvent à CHF 500 environ si la dans le cas d'une charge effectuée au domicile. Les frais de maintenance eux aussi, sont en règle générale moins élevés. De plus, les voitures électriques ne nécessitent aucune vidange ni changement de courroie trapézoïdale, et leur moteur présente un nombre de pièces nettement inférieur à celui des véhicules conventionnels. La valeur des véhicules électriques est par ailleurs plus stable: au bout de cinq ans, une voiture électrique se revend à un prix supérieur à celui d'un véhicule conventionnel acheté au même prix.

Les véhicules PHEV ont de nouveau eu le vent en poupe en 2020. D'après les experts, ce succès ne serait que provisoire. Ils estiment en effet que ces véhicules ne sont qu'une solution de transition, qui combine certes les avantages des véhicules à batterie et ceux des véhicules à moteur à combustion – et est donc synonyme de conduite respectueuse de l'environnement et d'autonomie quasi illimitée – mais qui a les inconvénients des technologies de propulsion. En outre, le fait que ces véhicules utilisent deux modes de propulsion complexifie leur équipements techniques, ce qui a un impact négatif sur les coûts de production. De plus, la double technologie de propulsion alourdi considérablement ces véhicules qui, de ce fait, peuvent être plus lourds que des véhicules à essence ou diesel de construction identique. En outre, les frais d'entretien eux aussi, sont supérieurs à ceux des BEV étant donné

qu'un moteur à combustion équipé de plus de 1000 composants est intégré aux PHEV en plus de la batterie.

En l'espace d'un an, le chiffre des nouvelles immatriculations de BEV est passé de 5000 à 12 000 et a donc plus que doublé en Suisse en 2019. Par conséquent, la Suisse se place en tête du classement européen. Cette progression de la demande est due à un élargissement continu de l'offre de BEV, ainsi qu'à des possibilités de recharge disponibles en plus grand nombre. En 2018, les voitures de tourisme équipées d'une propulsion alternative (BEV, PHEV) ont atteint une part de marché de 3,2 % pour les nouvelles immatriculations. Ce chiffre s'élevait déjà à 14,3 % en 2020. L'objectif initial fixé par la «feuille de route pour la mobilité électrique 2022» de l'ancienne conseillère fédérale Doris Leuthard, signée par plus de 50 sociétés et organisations de différentes branches, prévoyait une part de marché de 15 % pour tous les nouveaux achats, laquelle a donc été atteinte avec deux ans d'avance environ.

Source: SuisseEnergie. Véhicules à haute efficacité énergétique. Tendances du marché 2019 et 2020 | auto-suisse. PW 2020 | Jürg Meier. Nur wer diszipliniert ist, fährt sauber. NZZ am Sonntag, 02.08.2020 | Lorenz Honegger. Der Preis für die Reichweite bei Elektroautos hat sich halbiert: Trotzdem lohnt sich der Kauf nicht für jeden. NZZ, 03.08.2020

L'avenir de la mobilité électrique chinoise

Depuis de nombreuses années, la Chine est en tête du classement mondial du nombre de véhicules électriques nouvellement immatriculés, et ce, largement devant l'UE et les États-Unis. Elle peut donc être considérée à juste titre comme la force motrice de la mobilité électrique. Cette position tient surtout au fait

que jusqu'à récemment, la mobilité électrique a été une quasi doctrine étatique et a été soutenue par de généreuses subventions et un allègement des procédures d'immatriculation. Toutefois, il est possible que cette tendance se refroidisse étant donné que le gouvernement chinois a laissé expirer, à la surprise générale, sa politique d'aides et de primes à l'achat de 8000 € (après conversion) par voiture électrique en 2019. Dans ce contexte, il n'est pas étonnant de constater que les ventes de voitures électriques en 2019 ont stagné au niveau de 2018 en Chine.

La mobilité électrique est-elle en train de perdre la Chine, son marché phare ? Si la réponse devait être oui, cela aurait d'importantes répercussions notamment sur les constructeurs et fournisseurs européens, lesquels sont dans une certaine mesure dépendants du cap fixé par Pékin. À titre d'exemple, Volkswagen vend 40 % de ses véhicules en Chine. Cependant, les experts sont en désaccord sur les conséquences concrètes du changement de cap exigé par le gouvernement chinois, alors que les uns pensent que la part des BEV dans l'empire du Milieu ne connaîtra plus une croissance aussi forte dans les années qui viennent, les autres supposent que la mobilité électrique demeurera un pilier essentiel de la transition vers une mobilité durable de la Chine. La marche arrière opérée au sujet des subventions ne doit

pas être considérée comme un renoncement de Pékin aux BEV, mais plutôt comme un signal que la Chine souhaite consolider le marché des véhicules électriques et le rendre plus compétitif. Il est ainsi demandé aux constructeurs de vendre leurs BEV sur le marché sans bénéficier d'aides. En outre, le fait que les subventions soient remplacées par un quota invite également à l'optimisme. Ainsi, à compter de 2020, 10 % des voitures vendues en Chine devront être des véhicules électriques, 20 % à compter de 2025.

À en croire les communiqués officiels de Pékin qui mentionnent à maintes reprises de nouvelles technologies fondées sur le méthanol et l'hydrogène, l'avenir de la mobilité électrique semble s'inscrire en pointillés. En effet, la Chine pourrait être tentée de miser davantage sur les matières premières disponibles sur son territoire. Du méthanol peut être obtenu par gazéification de charbon chinois et de l'hydrogène par électrolyse. Les batteries lithium-ion sont, elles, constituées de matières premières importées comme le lithium ou le cobalt, qui proviennent en grande partie de l'Afrique de l'Est.

Sources : *Tages-Anzeiger*, 17.12.2019 | *Luzerner Zeitung*, 23.12.2019

Figure 4.2 : Moteurs de l'e-mobilité



4.2. Moteurs de l'e-mobilité

Une nouvelle sensation de conduite. Pour moi, l'environnement et tout le monde. La forte accélération offerte par les nouvelles technologies des voitures électriques procure un plaisir de conduire intense dès le démarrage.

4.2.1 Réduction des émissions de CO₂

Finis le diesel, en route vers l'électrique. Telle est la devise martelée par les groupes automobiles lorsqu'il s'agit de présenter leur future gamme de modèles. Cette évolution est provoquée par les prescriptions renforcées sur les gaz d'échappement et notamment par celles plus strictes en matière de réduction des émissions de CO₂ pour les voitures de tourisme et de livraison neuves. Ces règles s'appliquent en Europe et donc en Suisse depuis 2020. Le poids des voitures neuves en général et des SUV populaires en particulier ne cesse de croître et la proportion des véhicules 4x4 a pratiquement augmenté de 50 % en 2018. Par conséquent, les émissions de CO₂ des voitures neuves ont également connu une hausse. Raison pour laquelle il est devenu encore plus urgent d'agir en matière de réduction des émissions de CO₂. Les parts de marché des voitures de tourisme à faibles émissions (LEV) ont fortement augmenté depuis l'introduction des prescriptions sur les émissions en 2012, et ce, surtout en 2018 et 2019. Et la pression est encore accentuée par les discussions portant sur les interdictions de circulation pour les véhicules diesel dans les villes et sur leur extension à tous les pays (voir point 4.3.2). La mobilité électrique reçoit un nouvel élan par les quotas pratiqués dans des pays comme la Chine, qui exige que les véhicules zéro émission à l'échelle locale représentent une certaine part du marché.

Responsable d'environ un tiers des émissions de CO₂ nuisibles au climat, le secteur des trans-

ports est le principal émetteur de gaz à effet de serre en Suisse et la part du transport individuel motorisé s'élève à 60 % (2017). Afin d'honorer les engagements pris en matière de politique climatique dans le cadre du protocole de Kyoto de 1997, la loi sur le CO₂ a défini des objectifs de réduction et les moyens destinés à leur réalisation. Considérées comme une mesure essentielle dans le domaine de la mobilité, les prescriptions concernant les émissions de CO₂ s'appliquent aux voitures de tourisme neuves depuis le mois de juillet 2012, à l'instar de ce qui se pratique dans l'UE. Ces règles obligent les importateurs suisses à réduire les émissions de CO₂ des voitures de tourisme admises à circuler en Suisse pour la première fois. Depuis le 1^{er} juillet 2012, une sanction pour chaque gramme dépassant la valeur cible des émissions de CO₂ est appliquée à l'importateur.

Afin de favoriser une réduction plus importante des émissions de CO₂ produites par le secteur des transports, les prescriptions sur les émissions de CO₂ ont été adaptées au progrès technique dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050 et une nouvelle valeur cible, de **95 g de CO₂/km**, est depuis **2020 applicable aux voitures de tourisme** (voitures de livraison et tracteurs à sellette légers: 147 g de CO₂/km).

Bases légales

RS 641.71 Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ (loi sur le CO₂)

RS 641.711 Ordonnance sur la réduction des émissions de CO₂ (ordonnance sur le CO₂)

Source: SuisseEnergie. Véhicules à haute efficacité énergétique. Tendances du marché 2019 et 2020 | Office fédéral de l'énergie OFEN. Prescriptions concernant les émissions de CO₂ des voitures de tourisme et de livraison neuves. 29.10.2019 | Office fédéral des routes OFROU.

Prescriptions en matière de réduction des émissions de CO₂ | Office fédéral de l'énergie OFEN. Effets des prescriptions relatives aux émissions de CO₂ pour les voitures de tourisme neuves entre 2012 et 2018. 18.02.2020.

4.2.2. Zones à faibles émissions en milieu urbain (UE)

Au cours des années précédentes, l'Europe a adopté plusieurs mesures afin d'améliorer la qualité de l'air et d'empêcher les poussières fines et les oxydes d'azote d'avoir des effets néfastes sur la santé des personnes. Un grand nombre de villes européennes ont instauré des zones à faibles émissions, des zones de protection de l'air, des restrictions d'accès, des interdictions de circulation ou un péage urbain. Toutes ces mesures manquent cependant d'une réglementation harmonisée à l'échelle européenne. L'introduction de ces restrictions s'explique par le relevé de valeurs d'oxydes d'azote et de poussières fines nuisibles à la santé et souvent supérieures aux plafonds d'émissions atmosphériques de l'UE fixés par la législation.

Les secteurs concernés sont généralement situés dans les centres-villes où une zone à faibles émissions (Low Emission Zone (LEZ)) a été instaurée. Seuls les véhicules respectant certaines normes sur les gaz d'échappement sont autorisés à y circuler. L'interdiction de circulation pour les véhicules diesel introduite en Allemagne en 2018 s'applique à ces types de véhicule appartenant à une certaine catégorie d'émissions. Par ailleurs, une LEZ n'est en vigueur qu'à certaines heures de la journée. Ainsi, une zone à faibles émissions est susceptible d'être appliquée soit en permanence comme dans l'agglomération parisienne, soit à titre temporaire dans le cas d'un dépassement de certaines valeurs. Autre exemple: depuis

2020, la ville de Genève applique une interdiction de circulation aux véhicules à émissions particulièrement élevées entre 6 et 22 h les jours où l'air est fortement pollué.

Dans certaines villes, l'accès à une zone à faibles émissions n'est autorisé que si l'on a la vignette requise. À Genève, le macaron «Stick'Air» définit six catégories de polluants selon un système de couleurs et s'inspire de la vignette française «Crit'air» et de ses catégories d'émission. Ainsi, une interdiction de circulation s'applique en centre-ville pour certaines couleurs de vignette entre 6 et 22 h les jours de forte pollution. Le non-respect d'une zone à faibles émissions entraîne souvent des amendes importantes, pouvant atteindre les 2 700 EUR au Danemark.

L'introduction d'une zone à faibles émissions (circulation différenciée) fut décidée par Genève unilatéralement et sans base légale, car le Conseil fédéral s'était prononcé contre cette décision à l'échelle de la Suisse dans sa réponse à l'interpellation de Bastien Girod 18.384 Zones environnementales et mesures contre la pollution de l'air du 9 mai 2018.

La ville de Londres dispose à la fois d'un péage urbain (London Congestion Charge Zone) pour le centre-ville et d'une zone à très faibles émissions (Ultra Low Emission Zone (ULEZ)). Les véhicules diesel, essence et les motos d'une certaine catégorie d'émission doivent également payer une taxe ULEZ en plus du péage urbain.

Le site green-zones.eu (site Web ou application) fournit un aperçu des zones à faibles émissions instaurées en Europe et des informations mises à jour sur les règles en vigueur dans les villes et pays respectifs.

Sources: ADAC. *Zufahrtsbeschränkungen in Europa*. 18.02.2020 | *Dieselfahrverbot oder Umweltzone? Der Unterschied*. 28.01.2019 | www.greenzones.eu | TCS. *Umweltzonen in Europa*. NZZ. *Zürich liebäugelt mit einem Fahrverbot für ältere Dieselfahrzeuge*. 12.11.2019 | Helmut Stalder. *Genf macht die Innenstadt für Dreckschleudern dicht*. NZZ, 7.11.19

4.2.3. Promotion des stations de recharge rapide (SRR)

Les stations de recharge rapide (également appelées «stations-service électriques») permettent aux conductrices et conducteurs de voitures électriques de recharger rapidement leurs véhicules afin de pouvoir poursuivre leur route. Toutefois, il n'existe pas de définition généralement reconnue qui réponde à la question de savoir à partir de quelle valeur une station de recharge peut être considérée comme rapide. En 2017, une charge était considérée comme rapide à partir d'une puissance de charge minimale par point de recharge de 50 kW en courant continu ou de 43 kW en courant alternatif. Cette valeur ne présente cependant qu'un caractère provisoire et est soumise aux progrès de la technologie des véhicules électriques étant donné que la puissance de charge est définie en fonction de la valeur maximale standardisée et demandée par ces derniers sur chaque système de recharge. Autrement dit, les capacités supérieures des batteries favorisant une autonomie plus importante autorisent des puissances de charge plus élevées, lesquelles ont franchi la barre des 200 kW dans le cas de certains modèles. Ceci présuppose cependant une alimentation électrique performante, avec des puissances de raccordement appropriées.

Il est recommandé que l'infrastructure de recharge rapide soit non seulement la plus performante possible, mais aussi «non discrimi-

natoire». En d'autres termes, elle doit être accessible à tout moment et les BEV équipés de fiches courantes doivent pouvoir être rechargés.

La mise en place d'une infrastructure de recharge rapide revêt une importance capitale pour le développement de la mobilité électrique. Ce processus est considéré comme un levier essentiel à un accroissement durable de la demande de véhicules électriques. Les stations de recharge rapide sont quant à elles directement liées à la capacité des batteries. Plus ce réseau est dense et fiable, moins l'autonomie des véhicules et l'angoisse d'en manquer éprouvée par leurs conducteurs pèsent dans la balance. L'acceptation du BEV en tant que première voiture dépend en fin de compte d'un réseau performant de stations de recharge.

Un vaste réseau performant de stations de recharge rapide disponibles le long des 1850 km de routes nationales, installées et exploitées par des particuliers, constitue l'objectif déclaré du Conseil fédéral. À l'heure actuelle, une recharge rapide d'un BEV à l'intérieur du réseau autoroutier suisse est possible sur 35 des 59 aires de ravitaillement de la Confédération, ce qui représente une couverture de 60 % environ (situation au mois d'août 2019). Le 26 juin 2020, la première station de recharge rapide (SRR) pour véhicules électriques fut inaugurée sur une aire de repos de route nationale. L'objectif affiché par la Confédération dans sa feuille de route pour la mobilité électrique 2022 consiste à équiper toutes les aires de ravitaillement suisses et 100 aires de repos des cantons d'une infrastructure de recharge rapide. Sa réalisation permettra de disposer d'un total de 160 possibilités de recharge et d'environ 600 points de recharge si l'on prend également en compte les aires de ravitaillement.



Figure 4.3: Signalisation d'une station de recharge rapide sur les aires de ravitaillement

Des aires de ravitaillement et de repos adaptées à la mobilité de l'avenir apportent ainsi une contribution déterminante à la possibilité d'utiliser les véhicules électriques aussi sur de longues distances, et ce, avec un maximum de confort.

La carte interactive de l'OFEN (ich-tanke-strom.ch) indique en temps réel les stations de recharge disponibles en Suisse pour les véhicules électriques.

Sources: ABB Suisse SA. La mobilité électrique prend son élan. De bonnes infrastructures de recharge pour les véhicules électriques, 2018 | OFROU. Recharge rapide sur les routes nationales | Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 14.3997 de la CTT-N du 06.10.2014. Conditions préalables à la mise en place d'un réseau de stations de recharge rapide pour véhicules électriques sur les routes nationales, 2017 | OFROU. Recommandations concernant la mise en place de stations de recharge rapide le long des routes nationales, 2017 | e-mobile.ch | lemnet.org

5. Environnement / Durabilité

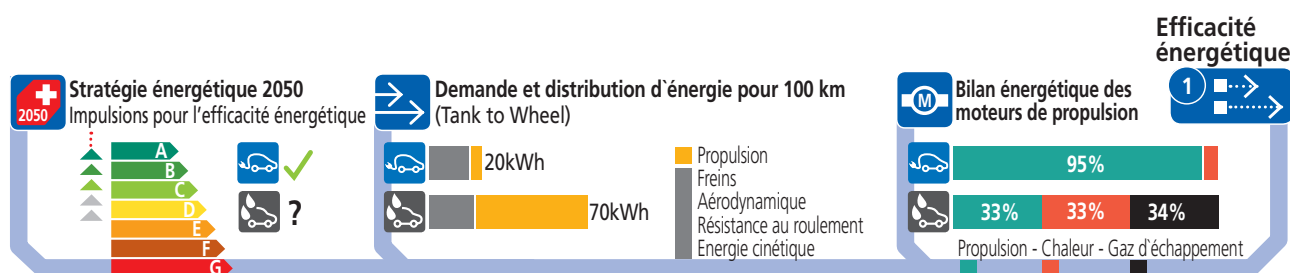
Même les experts sont en désaccord sur le degré d'efficacité de l'empreinte écologique des BEV. À notre point de vue, l'état actuel des connaissances est très bien résumé par l'étude du PSI de 2018 qui fournit un aperçu des impacts environnementaux causés par les voitures de tourisme équipées de différentes technologies de propulsion.

(OFEN) Incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain, février 2020

5.1. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique désigne le rapport entre l'utilité d'un système et l'énergie nécessaire à ce dernier. La différence entre l'énergie utile et l'énergie d'entrée permet de détermi-

Figure 5.1 : Efficacité énergétique



L'analyse de l'Institut Paul Scherrer constitue notre source d'information principale pour la section 5 qui tente de quantifier la durabilité des véhicules électriques. La fiche d'information de SuisseEnergie (OFEN) intitulée « Incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain » synthétise l'étude du PSI et contient des données mises à jour de février 2020.

Dans le cas de la comparaison des écobilans des BEV et des ICEV, il est important de prendre en considération l'ensemble du cycle de vie (Life Cycle Assessment (LCA)) des véhicules dans l'analyse qui englobe leur production, leur exploitation et leur élimination, ainsi que la mise à disposition des carburants.

Sources : Brian Cox et Christian Bauer. Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du Paul Scherrer Institut (PSI). Rapport de synthèse : Les incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain, septembre 2018 | Résumé et mise à jour de l'étude du PSI : SuisseEnergie

ner les pertes d'énergie du système considéré. Ces dernières années sont marquées par les efforts de la Confédération pilotés par l'OFROU pour accroître l'efficacité énergétique de la circulation routière. Les véhicules électriques alimentent l'espoir d'une augmentation considérable de l'efficacité à moyen terme. La mobilité électrique constitue un élément important en faveur d'une mobilité plus économe en énergie et plus compatible avec le climat. Les véhicules à pile à combustible et les véhicules au gaz naturel sont moins efficaces étant donné que la production d'hydrogène et, plus encore, la fabrication de méthane synthétique entraînent des pertes d'énergie substantielles.

5.1.1. Stratégie énergétique 2050 – Impulsions pour l'efficacité énergétique

Dans le contexte de la Stratégie énergétique 2050, adoptée en raison notamment de la ratification de l'accord de Paris sur le climat en 2016, les prescriptions sur les émissions de carbone des véhicules individuels ont été renforcées. Ainsi, la Confédération mise sur une

efficacité énergétique supérieure de la mobilité, un but qui doit être atteint via la promotion des véhicules électriques. Par conséquent, l'électrification du trafic routier constitue une technologie clé qui apporte sa contribution à la réalisation des objectifs de la Suisse en matière de politique énergétique, environnementale et climatique. Les véhicules électriques constituent un instrument important en faveur d'une mobilité durable et économe en énergie, car ils présentent le potentiel requis pour diminuer les concentrations de poussières fines et la consommation d'énergie. En outre, ils permettent de réaliser les objectifs de protection du climat en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de dioxyde de carbone nuisibles au climat.

Obligation de marquage au moyen de l'étiquette-énergie

Selon la loi sur l'énergie révisée dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050 et acceptée par le peuple en 2017, le Conseil fédéral est habilité à édicter des dispositions sur les indications uniformes et comparables relatives à la consommation énergétique spécifique de véhicules fabriqués en série (art. 44). L'article 10 et l'annexe 4.1 de l'ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique qui découle de la LEne définit une obligation de marquage au moyen de l'étiquette-énergie pour toutes les voitures neuves mises en circulation. Le concessionnaire doit apposer cette dernière de façon bien visible sur la voiture de tourisme ou à proximité de celle-ci. De plus, la publicité, les documentations de vente, les listes de prix et les configurateurs en ligne doivent mentionner des indications conformément à l'étiquette-énergie.

Outre les informations de base concernant les véhicules (poids à vide, type de propulsion, puissance), les renseignements suivants fi-

gurent également sur l'étiquette-énergie :

- la consommation de carburant ou la **consommation d'énergie**
- **la catégorie d'efficacité énergétique de A à G** (la lettre A désigne un véhicule économe en énergie, la lettre G un véhicule gourmand)
- **les émissions de CO₂** (échelle) sont indiquées en g/km en mode conduite, par rapport à la valeur cible de 115 g CO₂/km telle que définie pour toutes les voitures neuves vendues.

Depuis le 1^{er} janvier 2020, la catégorie d'efficacité énergétique doit aussi être représentée graphiquement, sous la forme d'une échelle de couleur. La répartition dans les différentes catégories repose sur la consommation d'énergie primaire absolue (soit la consommation d'énergie, y compris la promotion, la fabrication et la fourniture de l'agent énergétique) des véhicules et soutient ainsi l'objectif d'une baisse de la consommation de carburant moyenne des voitures de tourisme neuves. D'autres aspects environnementaux tels que les émissions de CO₂ ne sont pas pris en compte dans la répartition au sein des catégories d'efficacité énergétique. Les limites des catégories de l'étiquette-énergie sont mises à jour et recalculées chaque année par le DETEC.

À l'instar de l'étiquette-énergie pour les appareils ménagers, l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme fournit des informations simples et claires sur l'efficacité énergétique et permet donc d'établir des comparaisons dans ce domaine. Elle apporte aussi de la transparence à l'achat d'une voiture et permet de sensibiliser les acheteuses et acheteurs aux modèles respectueux de l'environnement. Certains cantons utilisent l'étiquette-énergie comme base de réduction fiscale sur les véhicules à moteur.

Sources: RS 730.00 Loi sur l'énergie (LEne) | RS 730.02 Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique d'installations, de véhicules et d'appareils fabriqués en série (Ordonnance sur les exigences relatives à l'efficacité énergétique, OEEE) /OFEN. L'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme, 2018 | OFEN. FAQ – Etiquette-énergie pour les voitures de tourisme, 2020 | OFEN. Modification de l'étiquette-énergie pour les voitures de tourisme neuves à partir du 1^{er} janvier 2020 | www.verbrauchskatalog.ch (TCS/ SuisseEnergie)

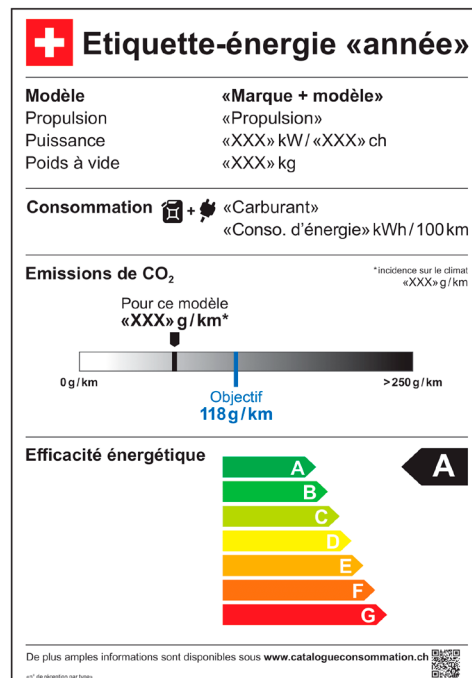


Figure 5.2 :
Étiquette-énergie

Source : ver-
brauchskatalog.ch

5.1.2. Besoins en énergie et répartition pour 100 km (tank-to-wheel)

Efficacité well-to-wheel (WtW)

L'efficacité énergétique totale d'un véhicule à moteur (efficacité énergétique well-to-wheel = du puits à la roue) se compose de l'efficacité énergétique de la chaîne en amont (well-to-tank = du puits au réservoir) et de l'efficacité du véhicule (tank-to-wheel = du réservoir à la roue). Afin d'obtenir une comparaison la plus exacte possible du rendement des BEV et des ICEV, il convient de faire appel à une analyse well-to-wheel qui permette de calculer toutes les émissions directes et indirectes sur l'ensemble de la chaîne, et ce, de la production et de la fourni-

ture d'un carburant ou d'un agent énergétique jusqu'à la transformation en énergie cinétique.

Si l'on compare l'ensemble de la chaîne de rendement, soit de la production de l'énergie primaire à la roue du véhicule, sous la forme d'un bilan well-to-wheel, on constate que le bilan énergétique des véhicules à batterie est nettement meilleur que celui des véhicules à moteur à combustion. Plus le mix électrique appliqué aux BEV est généré à partir de sources d'énergie renouvelables, moins les émissions WtW sont nombreuses étant donné que celles-ci évoluent directement en fonction des émissions issues de la production d'électricité.

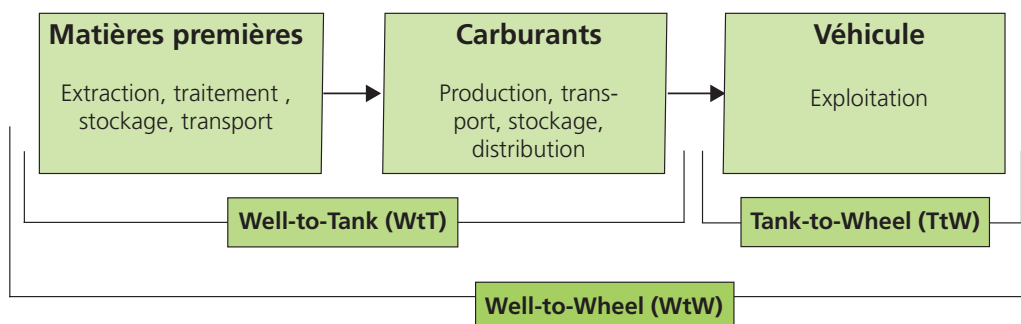


Figure 5.3: Périmètre
de l'ensemble du
système well-to-
wheel

Source : Schéma
réalisé par l'auteur

Efficacité well-to-tank (WtT)

Le processus well-to-tank débute par la production de l'énergie primaire et s'achève par le stockage de cette énergie dans la batterie ou le réservoir du véhicule. L'énergie requise à cet effet est considérée comme utilisation d'énergie primaire. La première étape consiste à extraire les matières premières naturelles comme le pétrole brut, mais aussi à utiliser l'énergie cinétique du vent au moyen d'une éolienne, ou l'énergie de panneaux solaires. L'énergie primaire produite est ensuite transformée en une forme pouvant être stockées dans le véhicules : l'énergie secondaire. Ce processus peut se dérouler dans une raffinerie, où le pétrole brut ou le gazole sera débarrassé de ses impuretés, ou dans une éolienne ou une installation photovoltaïque, où l'énergie éolienne/solaire sera convertie en courant électrique. Cette transformation ne s'effectue pas sans pertes. Son rendement énergétique est désigné par le terme d'efficacité well-to-tank et présente des ratios différents selon le type d'énergie primaire.

Les **agents énergétiques** sont des matières ou des sources naturelles qui, du fait de leur teneur énergétique élevée, se prêtent à la couverture de nos besoins en énergie

Les **agents énergétiques primaires** n'ont pas (encore) été soumis à une transformation ou à un traitement technique. Ils se trouvent à l'état naturel. Les agents énergétiques primaires utilisés ou exploités actuellement sont le pétrole (brut), le gaz naturel, le charbon, la tourbe, l'uranium naturel (énergie nucléaire), le bois et les autres éléments de la biomasse, la force du vent, de la marée, des vagues, des courants marins et de l'eau, le rayonnement solaire, la géothermie et la chaleur ambiante.

Les **agents énergétiques secondaires** sont produits par transformation ou traitement technique à partir des agents énergétiques primaires. Les agents énergétiques secondaires utilisés actuellement sont les produits pétroliers tels que les huiles de chauffage, l'essence, le diesel, les carburants d'aviation, le gaz liquide, les cokes de pétrole, le propane et le butane, le pétrole lampant et autres dérivés du pétrole, les cokes, les briquettes, le charbon de bois, les pellets, l'électricité, le gaz de ville, le biogaz, la chaleur à distance, l'alcool et l'hydrogène. La transformation de l'énergie primaire en énergie secondaire est effectuée (avec des pertes énergétiques) dans les raffineries, les centrales électriques, les usines à gaz, les centrales de chauffage à distance, les installations à biogaz et autres types de centrales et d'installations (combinées entre elles ou non).

Les **pertes de transformation** : la transformation des agents énergétiques primaires en agents énergétiques secondaires entraîne des pertes d'énergie. La quantité d'énergie issue du processus de transformation est inférieure à celle introduite.

Les **pertes de transport** : le transport de l'énergie ou des agents énergétiques requiert, lui aussi, de l'énergie. Dans le cas de l'électricité, ces pertes de transport surviennent sur les lignes et éventuellement lors du stockage de l'énergie dans une batterie ou une centrale de pompage-turbinage. S'agissant des combustibles pétroliers, ces pertes concernent à la fois l'énergie de pompage destinée aux pipelines, aux pompes de transbordement dans les entrepôts (ports, sites de stockage intermédiaire) et les stations-service, et l'énergie de transport pour les bateaux et les camions.

Efficacité tank-to-wheel (TtW)

Une fois l'énergie stockée dans le véhicule, celle-ci doit être transformée par le système de propulsion (moteur, boîte de vitesses, etc.) en énergie cinétique sur la roue afin de faire avancer le véhicule. Ce processus entraîne des pertes d'énergie dans le système de propulsion. De plus, le véhicule doit vaincre des résistances à l'avancement dues à la résistance de l'air et à celle au roulement, ainsi qu'à l'inertie du véhicule. Dans les côtes, celui-ci doit aussi surmonter la force d'attraction terrestre. Et, le freinage aussi, requiert de l'énergie. Le rendement qui correspond au rapport entre le nombre de kilomètres parcourus et l'énergie stockée ou chargée, est désigné par l'expression: efficacité «tank-to-wheel». Cette dernière est liée au rendement du système de propulsion (voir point 5.1.3), ainsi qu'à l'aérodynamique et à d'autres paramètres du véhicule, tels que le matériau des pneus.

La consommation d'énergie destinée à l'utilisation du véhicule se calcule sur la base de la procédure d'essai mondiale harmonisée pour véhicules légers, appelée «Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure (WLTP)». La comparaison de l'efficacité TtW entre ICEV et BEV montre que les véhicules à batterie déploient une énergie identique à celle des véhicules à moteur à combustion pour vaincre la résistance de l'air et celle au roulement, ainsi que pour accélérer (énergie cinétique) et gravir les côtes (énergie potentielle). Les BEV sont, pour leur part, capables de récupérer une bonne partie de ces énergies lorsqu'ils ralentissent, freinent et roulent en descente, ce qui permet d'améliorer considérablement leur bilan énergétique dans un pays montagneux comme la Suisse. Les besoins énergie des BEV sont globalement nettement inférieurs (20 kWh contre 70 kWh pour les ICEV), car leur moteur élec-

trique, particulièrement efficace, consomme moins d'énergie pour leur propulsion. Le rendement TtW d'un véhicule électrique est donc au moins trois fois supérieur à celui d'un véhicule à moteur à combustion.

Sources : Julius Jöhrens et Hinrich Helms. Konzept zur zukünftigen Beurteilung der Effizienz von Kraftfahrzeugen. 2013 | Forschungs-Informations-System. Mobilität und Verkehr. 2019 | Well-to-Wheel Betrachtung der Antriebstechnologien | PSI. Rapport de synthèse: Les incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain, 2018 | OFEN. Statistique globale suisse de l'énergie 2019

5.1.3. Bilan énergétique des moteurs de propulsion

Le rendement théorique (au banc d'essai) des moteurs à combustion avoisine les 33 %. Autrement dit, seul un tiers de l'énergie chimique fournie par le carburant est transformé en énergie mécanique motrice. La majeure partie de cette énergie, soit les deux tiers de l'énergie primaire, est perdue sous forme de gaz d'échappement et de chaleur, et ne peut donc être utilisée comme énergie utile pour le moteur à combustion. Dans le cas des ICEV la transformation en énergie motrice s'accompagne donc de pertes importantes étant donné qu'un tiers de l'énergie est rejeté dans l'environnement

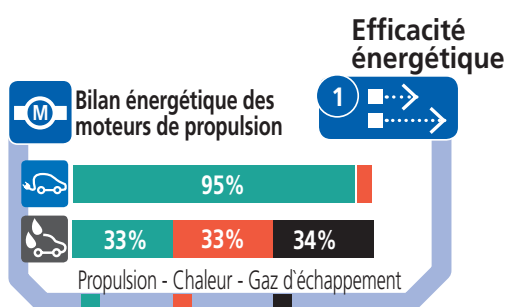


Figure 5.4 : Bilan énergétique des moteurs de propulsion

sous forme de gaz d'échappement. Un dernier tiers est lié à l'échauffement du moteur. Cette énergie thermique est rejetée dans l'environnement par refroidissement (c'est pourquoi les ICEV disposent de grands radiateurs dans leur partie frontale). Une part non négligeable de l'énergie fournie par le carburant est utilisée à des fins d'extraction permanente de la chaleur à l'intérieur du moteur au moyen de l'eau de refroidissement dans le but d'éviter toute surchauffe. Pendant l'hiver, une partie de la chaleur est sollicitée afin de chauffer l'intérieur de l'habitacle du véhicule.

Le graphique de la figure 5.4 indique clairement que les systèmes de propulsion électrique présentent un bien meilleur bilan énergétique que celui des moteurs à propulsion fossile. Les véhicules électriques sont des véhicules zéro émission à l'échelle locale et, à la différence des véhicules à essence et diesel, ils ne produisent aucun gaz d'échappement. Le rendement moyen d'une propulsion électrique est de 95 %. Autrement dit, 95 % de l'électricité fournie sont transformés en énergie cinétique. Seuls 5 % de l'énergie de sortie sont perdus,

sous forme de chaleur dans le système de refroidissement du véhicule ou dans l'air ambiant. Les pertes nettement plus faibles, à quantité d'énergie égale, d'un moteur électrique, lui permettent de présenter une autonomie bien supérieure à celle d'un moteur à combustion, lequel consomme environ trois fois plus d'énergie qu'un véhicule électrique.

Ce graphique ne tient pas compte des 10 % de pertes de rendement qui surviennent directement lors de la charge, à savoir

1. entre le point de raccordement de la borne Wallbox et la fiche du boîtier de batterie
2. dans l'onduleur qui transforme le courant alternatif en courant continu pour la batterie
3. dans la batterie en raison de la résistance interne

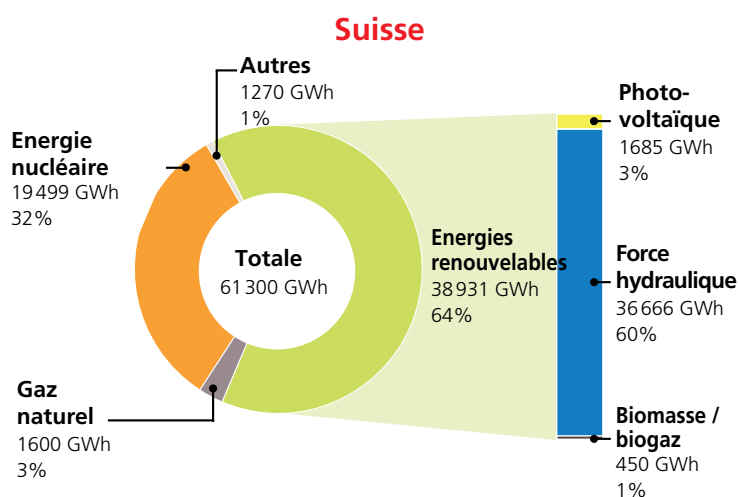
Une part de 90 % de l'énergie provenant de la prise et payée est donc stockée dans la batterie. Comparés aux moteurs à combustion, les moteurs électriques présentent, à kilométrage équivalent, un rendement nettement supérieur et consomment moins d'énergie. En outre, le niveau de développement élevé des propulsions conventionnelles limite le potentiel d'amélioration de leur efficacité.

5.2. Impact environnemental

La méthode d'analyse du cycle de vie (Life Cycle Assessment LCA) permet d'examiner toutes les incidences environnementales d'un produit ou d'une prestation de service, en l'occurrence ici celles relatives au véhicule électrique. L'analyse LCA prend en compte l'ensemble du cycle de vie d'un produit, soit la fabrication de tous les composants, l'exploitation, les opérations de maintenance et, pour finir, l'élimination ou le recyclage. Les incidences environnementales causées par l'extraction ou la production et le traitement des matières premières et des agents énergétiques

Figure 5.5 : Mix électrique suisse

Source : Eurostat, Statistique suisse de l'électricité 2017, statistique suisse des énergies renouvelables 2017, base de données ecoinvent



sont contrôlées lors de chaque phase du cycle. Parmi ces incidences figurent notamment les émissions de gaz à effet de serre (outil de mesure des impacts potentiels sur le changement climatique), la consommation d'énergie primaire (outil de mesure de l'efficacité énergétique) et d'autres indicateurs de répercussions sur la santé humaine comme les concentrations de poussières ou d'ozone proche du sol.

Dans le cas de l'évaluation de l'impact environnemental total des BEV et de l'analyse LCA, il est très important de prendre également en compte, en plus du bilan well-to-wheel, celui du cycle de vie (cradle-to-grave, du berceau à la tombe) qui analyse l'impact environnemental de l'extraction de matières premières, de la construction, de l'entretien et du recyclage ou de l'élimination des véhicules. Les stratégies efficaces de protection du climat dans le domaine de la technologie des véhicules reposent en fin de compte sur une approche cradle-to-grave et well-to-wheel qui poursuit les objectifs suivants: la réduction de la consommation finale d'énergie, l'accroissement de la part d'énergie primaire renouvelable (well-to-tank), l'amélioration de l'efficacité de transformation de l'énergie primaire en énergie finale (tank-to-wheel), ainsi que des processus de fabrication et d'élimination des véhicules qui préservent davantage les ressources.

Pour finir, il convient de mentionner ici que le présent écobilan repose sur le mix électrique suisse en ce qui concerne l'alimentation des véhicules en électricité (voir également à ce propos la section 9 Electricité / Fourniture).

Source: PSI. Rapport de synthèse: Les incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain, 2018 | OFEN. L'électricité consommée en Suisse en 2018 provenait à 74 % des énergies renouvelables, 17.02.2020

5.2.1. Gaz d'échappement

Les véhicules à propulsion uniquement électrique sont également désignés par l'expression «véhicules zéro émission (Zero Emission Vehicles (ZEV))» étant donné qu'ils ne produisent aucune émission locale (gaz d'échappement) pendant leur conduite. Ainsi, ils apportent une contribution essentielle à l'amélioration de la qualité de l'air dans des zones à volume de trafic élevé. Les véhicules zéro émission constituent une condition préalable à la décarbonation du trafic et des transports.

Les véhicules à moteur à combustion rejettent à l'échelle locale des polluants atmosphériques dus à leur propulsion. Les émissions produites par l'abrasion des pneus et des freins de tout type de véhicule, varient selon le style de conduite et le système de propulsion. Les gaz d'échappement sont un mélange toxique com-

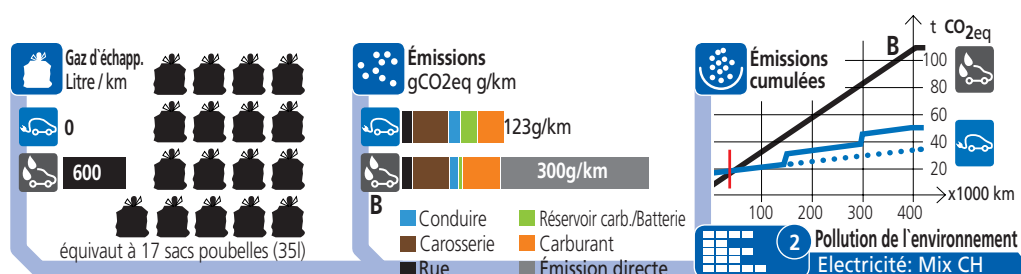


Figure 5.6: Impact environnemental

posé non seulement d'oxyde d'azote et de vapeur d'eau majoritairement sans risques, mais aussi d'un dioxyde de carbone nuisible au climat et d'autres polluants. Ces derniers sont malheureusement souvent ignorés dans les discussions sur le dioxyde de carbone néfaste au climat. Or, ils présentent un caractère directement préjudiciable aux personnes, aux animaux et à l'environnement et peuvent être très toxiques voire cancérigènes. Parmi les polluants majeurs présents dans les gaz d'échappement figurent le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, les hydrocarbures, les oxydes de soufre, les poussières fines et la suie.

5.2.2. Émissions (de gaz à effet de serre, outil de mesure des nuisances au climat potentielles des véhicules)

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) des Nations Unies a défini le «potentiel de réchauffement global» (PRG) afin de pouvoir comparer les effets néfastes sur le climat produits par les différents gaz à effet de serre. Le PRG est exprimé en équivalents CO_2 (CO_2 Equivalents, CO_2eq ou CO_2e). L'équivalent CO_2 désigne l'unité de mesure indiquant la contribution au réchauffement climatique d'un gaz qui présenterait la même

quantité de CO_2 pendant une période donnée (100 ans en règle générale). Cette valeur exprime la force de l'impact climatique ou du potentiel de réchauffement d'un gaz.

Les équivalents CO_2 (CO_2eq) sont une unité de mesure visant à uniformiser l'impact climatique des différents gaz à effet de serre.

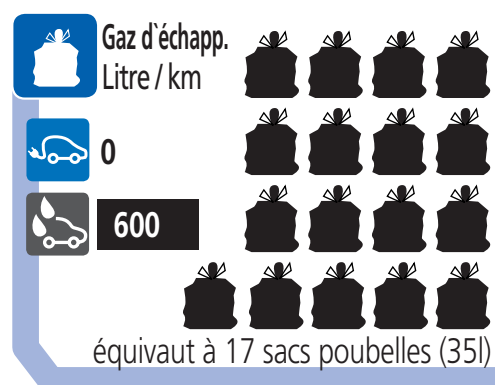
Le graphique ci-contre montre clairement que les émissions nuisibles au climat produites au cours de la fabrication et celles relatives au well-to-wheel sont environ deux fois plus importantes pour les ICEV (300 g d'équivalent CO_2) que pour les véhicules à batterie (123 g d'équivalent CO_2).

Dans l'hypothèse où le mix électrique suisse (en 2018) est lié à des émissions de gaz à effet de serre relativement faibles grâce à la force hydraulique et à l'énergie nucléaire, les BEV sont nettement plus respectueux du climat que les ICEV.

Quand on examine la répartition des équivalents CO_2 entre les différents composants, on constate, concernant les ICEV, que ce sont surtout les émissions directes qui font la différence pendant la conduite. À la différence des BEV sans gaz d'échappement, les ICEV produisent environ 1,5 fois plus de gaz à effet de serre pendant la conduite (TtW) en plus des émissions indirectes (WtT, construction du véhicule comprise).

La construction d'un BEV, qui englobe la batterie ou le réservoir et la carrosserie, génère des émissions de gaz à effet de serre supérieures à celles nécessaires à la fabrication d'un ICEV. Cette réalité s'explique par l'importante quantité d'énergie requise pour la production des batteries. Ceci dit, les émissions de gaz d'échappement des véhicules conventionnels pèsent nettement plus sur le bilan climatique total étant donné qu'elles dépassent largement le niveau

Figure 5.7 : Gaz d'échappement (l/km)



	ICEV (CO ₂ eq g/km)	BEV (CO ₂ eq g/km)
Route	19	19
Carrosserie (châssis et entretien)	50	49
Propulsion	8	7
Réservoir/batterie (système de stockage d'énergie)	1	28
Production de carburant	39	20
Émissions directes	183	0
Total	300	123

Tableau 5.1 : Répartition des gaz à effet de serre par véhicule-kilomètre en fonction des composants WtW (construction du véhicule incluse)

Carculator.psi.ch (2020, classe moyenne)

des émissions causées par la fabrication des batteries pour véhicules électriques.

5.2.3. Émissions cumulées

Les émissions cumulées représentées sur le graphique comprennent les émissions de gaz à effet de serre rejetées pendant toute la durée de vie (cycle de vie) des véhicules, et ce, jusqu'à un kilométrage de 400 000 km. Les émissions de gaz à effet de serre au kilomètre zéro concernent les processus de production et d'élimination et ne sont donc pas liés au kilométrage parcouru. Ces émissions sont dans le cas des BEV, supérieures à celles des ICEV en raison de la fabrication, énergivore, de leurs batteries. Après 40 000 km environ, les BEV compensent les émissions générées lors de la production grâce aux rejets de gaz à effet de serre nettement plus faibles pendant la phase d'exploitation (WtW) sur la base du mix électrique suisse.

La trajectoire ascendante des courbes indique le niveau des émissions pendant l'exploitation (WtW). Celles-ci proviennent des gaz d'échappement des ICEV et de la production d'électri-

cité et de carburant pour les deux types de véhicule. À la différence de la courbe des BEV, celle des ICEV grimpe en flèche étant donné qu'ils produisent plus de gaz à effet de serre par kilomètre parcouru. La forme en escalier prise par la courbe des émissions des BEV s'explique par le remplacement des batteries qui, selon les prévisions établies d'après l'état actuel de la technique, doivent être remplacées tous les 150 000 km. La trajectoire ascendante de la courbe des BEV dépend des émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité.

Source: PSI. Rapport de synthèse: Les incidences environnementales des voitures de tourisme – aujourd'hui et demain, 2018

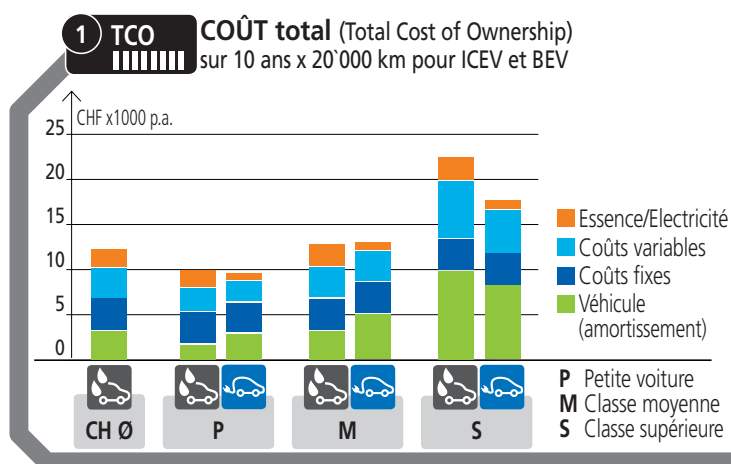
6. Coûts / Efficacité

Les critères de coût figurent, au même titre que l'autonomie et l'infrastructure de recharge disponible¹, parmi les paramètres les plus importants à prendre en compte au moment de choisir un véhicule électrique.

6.1. Coûts totaux (TCO)

La comparaison des véhicules électriques et des véhicules à moteur à combustion en termes de rentabilité repose sur les coûts totaux (Total Costs of Ownership (TCO)). Les TCO comprennent tous les coûts engendrés par l'acquisition et l'utilisation d'un véhicule au-delà de sa durée d'usage totale. Ce point précisément, est très instructif pour la comparaison des différents systèmes de propulsion étant donné qu'un véhicule électrique présente des coûts d'acquisition certes souvent supérieurs à ceux de son pendant conventionnel. Ses coûts d'exploitation sont cependant nettement inférieurs. Les TCO équivalent à la somme des coûts d'acquisition à l'instant de référence $t=0$ et des coûts variables et fixes pendant toute la durée de vie du véhicule, qui sont escomptés durant la période analysée.

Figure 6.1 : Coûts totaux (voitures les plus vendues des classes)



¹ Principe AIP: Autonomie – Infrastructure – Prix

Le graphique indique la rentabilité des véhicules électriques par rapport à celle des véhicules conventionnels pour différentes catégories de voitures particulières, et ce, dans le cadre d'une comparaison des coûts totaux. Le modèle TCO tient compte de tous les paramètres de coût pertinents pendant la durée d'usage du véhicule du point de vue de son propriétaire. Ces derniers dépendent à chaque fois de la catégorie de taille concernée (petite voiture, classe moyenne ou classe supérieure) et des conditions-cadres définies sur dix ans pour un kilométrage de 200 000 km dans le cas du présent graphique. Ce graphique tient explicitement compte des paramètres de coût suivants :

- Véhicule (amortissement) : coûts d'acquisition
- Coûts fixes : assurance
- Coûts variables : entretien et réparations / remplacement de composants du véhicule
- Essence/Electricité (coûts de carburant)

Alors que les TCO suivent plus ou moins la même évolution pour les BEV et les ICEV des segments des petites voitures et des classes moyennes (sauf différences entre les paramètres de coût individuels), ceux des BEV de classe supérieure sont nettement inférieurs à ceux des ICEV de cette catégorie. Les TCO des petits BEV ne sont eux que très légèrement inférieurs à ceux des ICEV. Dans le cas des voitures de classe moyenne, les ICEV présentent des TCO à peine meilleurs. Les TCO allant de la petite voiture à la voiture de classe moyenne n'enregistrent qu'une légère hausse aussi bien dans le secteur des ICEV que dans celui des BEV. Si l'on compare les véhicules de la classe moyenne à ceux de la classe supérieure, alors les TCO affichent une différence bien plus prononcée, en particulier pour les ICEV.

Les différences entre les véhicules à essence ou diesel et les véhicules électriques sont les plus

Paramètre de coût*	CH Ø ICEV	Petite voiture		Classe moyenne		Classe supérieure	
		ICEV	BEV	ICEV	BEV	ICEV	BEV
Véhicule (amortissement)	CHF 3 150 (26,5 %)	CHF 1 607 (16,7 %)	CHF 3 051 (31,5 %)	CHF 3 158 (25,5 %)	CHF 5 038 (39,9 %)	CHF 9 927 (44,6 %)	CHF 8 188 (47,2 %)
Coûts fixes	CHF 3 461 (29 %)	CHF 3 455 (35,9 %)	CHF 3 459 (35,6 %)	CHF 3 460 (27,9 %)	CHF 3 465 (27,4 %)	CHF 3 478 (15,7 %)	CHF 3 474 (20,1 %)
Coûts variables	CHF 3 314 (27,9 %)	CHF 2 634 (27,4 %)	CHF 2 438 (25,2 %)	CHF 3 324 (26,8 %)	CHF 3 322 (26,4 %)	CHF 6 332 (28,5 %)	CHF 4 722 (27,2 %)
Essence / Electricité	CHF 1 974 (16,6X%)	CHF 1 920 (20 %)	CHF 750.– (7,7 %)	CHF 2 464 (19,8 %)	CHF 800.– (6,3 %)	CHF 2 482 (11,2 %)	CHF 950.– (5,5 %)
Total	CHF 11 899	CHF 9 616	CHF 9 689	CHF 12 406	CHF 12 625	CHF 22 219	CHF 17 334

flagrantes en termes de perte de valeur et d'amortissement (à partir de la valeur d'acquisition). La perte de valeur proportionnellement aux coûts totaux des véhicules électriques se situe entre 8 % et 12 % et présente donc un niveau similaire à celui des véhicules conventionnels. L'incertitude qui plane sur le marché en raison des prix que peuvent atteindre les véhicules électriques d'occasion constitue le facteur qui fait grimper la perte de valeur prévue.

Les petits BEV et ceux de classe moyenne sont plus coûteux à l'achat que les ICEV. Or c'est précisément l'inverse qui se produit dans le cas des véhicules de classe supérieure. Le prix des batteries lithium-ion constitue l'une des raisons principales des coûts d'acquisition actuellement élevés des BEV. L'évolution au cours de ces dernières années montre clairement que les coûts de fabrication des batteries baissent fortement. D'après une étude de BloombergNEF, les coûts des packs de batteries lithium-ion ont chuté de près de 70 % entre 2010 et 2020. Les économies supplémentaires réalisées grâce à de nouvelles technologies et à d'autres optimisations du processus de fabrication vont continuer d'accroître la compétitivité des BEV au cours des prochaines années.

Les véhicules électriques compensent leurs coûts d'acquisition élevés par des dépenses plus faibles pour la maintenance et le carbu-

rant. La structure de la propulsion électrique comporte moins de pièces d'usure, ce qui rend son entretien moins coûteux. De plus, elle ne nécessite aucun lubrifiant ni bougie d'allumage et ni filtre à air et à carburant. Pas non plus de système anti-pollution à entretenir, ni de vidange à effectuer. Une voiture électrique prend nettement moins souvent le chemin du garage et l'entretien se limite généralement à quelques petites interventions telles que le remplacement du filtre à pollens. D'où des frais de maintenance divisés par deux.

Comparativement aux véhicules à moteur à combustion qui entraînent des dépenses en carburant (essence/gazole) au moins deux fois plus élevées, les coûts de carburant des voitures électriques de toute taille ne cessent de baisser. Cet écart de prix a tendance à s'accroître étant donné que des taxes majorées sont à prévoir notamment pour les combustibles fossiles, et ce, en raison des objectifs de décarbonation du trafic dans le cadre de la législation sur la protection du climat. En effet, l'évolution des prix des carburants et des batteries sera, elle aussi, considérée comme un facteur déterminant des coûts totaux des véhicules équipés de différents types de propulsion.

Pendant de nombreuses années, la devise se résumait en une phrase: «Les véhicules élec-

Tableau 6.1 : Comparaison des TCO des ICEV et des BEV classés par catégorie de taille

Source: Calculateur TCS

* CHF p.a. (part en % des TCO)

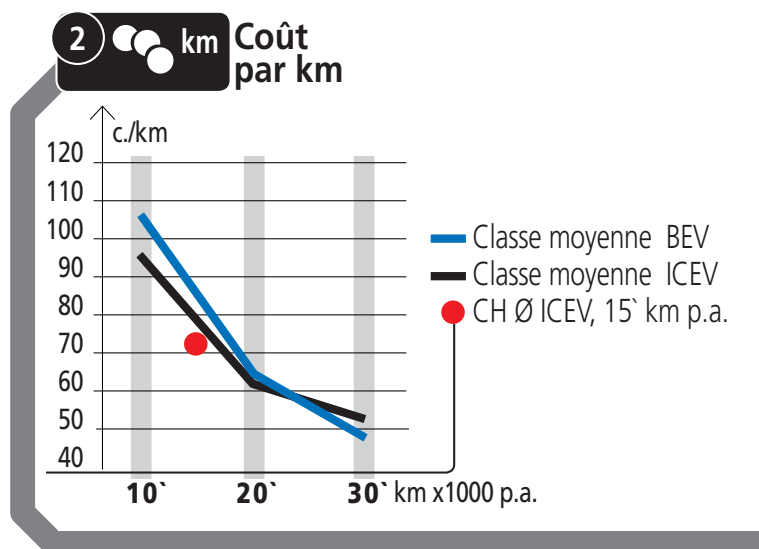


Figure 6.2 : Coût par kilomètre

triques sont chers». Désormais, cette affirmation n'est correcte qu'en partie. Certes l'acquisition d'une voiture électrique est en règle générale encore plus coûteuse que l'acquisition de leurs pendants à essence ou diesel. Mais la comparaison des TCO montre que les BEV de petite taille et ceux de la classe supérieure présentent un prix moyen plus avantageux que celui des véhicules à moteur à combustion conventionnels. De plus, les véhicules électriques se distinguent souvent par une plus grande stabilité de leur valeur. Au bout de cinq ans, une voiture électrique se revend à un prix supérieur à celui d'un véhicule conventionnel acheté à un prix identique.

Cet avantage serait susceptible de s'accroître dans les années à venir étant donné que les ICEV seront de plus en plus difficiles à vendre en raison des diverses interdictions de circulation ou d'immatriculation prévues et des arrêts annoncés de leur développement.

Sources: Martin Wietschel et al. Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation ISI. 2019 | Brian Cox, Christian Bauer, Angelica Mendoza Beltran, Detlef P. van Vuuren, Christopher L. Mutel. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. PSI, 2020 | Lorenz Honegger. Der Preis für die Reichweite bei

Elektroautos hat sich halbiert: Trotzdem lohnt sich der Kauf nicht für jeden, 03.08.2020

6.2. Coûts par kilomètre

Les économies réelles générées par les voitures électriques dépendent aussi du comportement de leurs conducteurs. Le graphique représenté ici indique clairement que plus le kilométrage augmente, plus l'avantage financier est important, comparativement à un véhicule conventionnel. Le seuil de rentabilité valable notamment pour le secteur important des véhicules de classe moyenne se situe à 20000 km. Autrement dit, un véhicule électrique devient plus avantageux que son pendant à moteur à combustion à partir de ce kilométrage.

Une étude de 2020 tire la conclusion suivante à partir de la comparaison du cycle de vie et des coûts totaux des BEV et des ICEV de différentes tailles : les véhicules présentant des batteries plus petites et un kilométrage supérieur sont les plus respectueux du climat et les moins coûteux. Si l'on prend la moyenne de toutes les catégories de taille, le véhicule électrique obtient, là aussi, de meilleurs résultats que le véhicule à moteur à combustion compte tenu des TCO et des émissions de gaz à effet de serre. L'électrification des propulsions des voitures de tourisme se révèle avantageuse tant d'un point de vue écologique que sur un plan économique étant donné que ce processus n'entraîne, en moyenne, pas de coûts considérablement supérieurs. En outre, le potentiel TCO de la mobilité électrique est encore loin d'être entièrement exploité d'après les experts.

Source: Brian Cox, Christian Bauer, Angelica Mendoza Beltran, Detlef P. van Vuuren, Christopher L. Mutel. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. PSI, 2020

7. Mobilité 20xx

7.1. Utilisation quotidienne des BEV

7.1.1. Autonomie

L'«angoisse de l'autonomie» (range anxiety). C'est ainsi que les experts désignent la crainte éprouvée par les novices du véhicule électrique que le «plein» de leur voiture ne suffira pas pour terminer leur trajet en cours. Chez ces personnes, le risque d'une panne d'un BEV qui surviendrait en raison d'une batterie vide à de nombreux kilomètres de la prochaine station de recharge est nettement supérieur à celui présenté par un ICEV. L'autonomie est l'un des éléments de l'abréviation AIP qui fait référence aux facteurs de succès majeurs de la mobilité électrique, à savoir l'autonomie, l'infrastructure (stations de recharge) et le prix. Bien que la capacité des batteries des véhicules électrifiés ne cesse d'augmenter et qu'elle suffise, depuis longtemps déjà, pour effectuer les trajets quotidiens, l'angoisse de l'autonomie apparaît toujours à maintes reprises dans les discussions sur l'aptitude de la mobilité électrique à un usage quotidien. Mais au fil de ses expériences, le propriétaire du véhicule électrique perd relativement vite son angoisse de l'autonomie.

La règle générale pour le calcul de l'autonomie est la suivante :

les ordinateurs de bord modernes calculent l'autonomie restante en prenant en compte la consommation d'énergie de tous les groupes, ainsi que le style de conduite. Ils sont ensuite en mesure de prédire le temps de recharge pour le véhicule électrique.

L'autonomie réelle d'un BEV dépend de différents facteurs. D'une part, la **capacité de la batterie** joue un rôle décisif. En règle générale, plus la capacité de la batterie est importante, plus l'autonomie est grande. Le vieillissement

de la batterie dû aux processus électrochimiques pendant sa durée de vie influe négativement sur sa puissance. Et d'autre part, la puissance effectivement nécessaire au véhicule est importante. Elle ne doit pas être confondue avec la puissance maximale dans des conditions tout à fait spécifiques. De plus, elle dépend des conditions suivantes :

- le **modèle du véhicule** : il convient de se référer au graphique de la figure 7.1 qui indique l'autonomie en fonction de la catégorie du véhicule électrique.
- l'**équipement électronique** : les récepteurs électroniques, tels que la climatisation, le chauffage, la navigation et la radio, consomment le courant de batterie du véhicule électrique.
- le **profil de trajet**
- le **style de conduite** : un style de conduite énergivore caractérisé par de très grandes vitesses et des accélérations et freinages incessants réduit l'autonomie.
- la **vitesse** : en règle générale, une vitesse élevée associée à des pertes par frottement accrues et à une résistance de l'air importante, réduit l'autonomie du véhicule de façon disproportionnée. La vitesse qui préserve la batterie au maximum, dépend du véhicule. Elle est mentionnée dans les indications du constructeur.
- Une **pression des pneus** trop faible et des **pneus d'hiver** augmentent la résistance au roulement et donc la consommation d'énergie de la voiture électrique.
- la **température extérieure** : l'autonomie standardisée définie par la procédure d'essai mondiale harmonisée pour les véhicules légers WLTP («Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure») est relevée dans des conditions de laboratoire, soit à une température de 20°C. D'après une étude actuelle de la Norwegian Automobile Fede-

ration (NAF), la perte d'autonomie moyenne en conditions hivernales s'élève à 18,5 % par rapport aux indications de la procédure WLTP. L'écart considérable de ces pertes compris entre 10 % et 30 % prouve également que certains modèles de voiture supportent nettement mieux le froid que d'autres. D'une part, les pertes d'autonomie sont liées à une puissance de batterie réduite étant donné que les basses températures ralentissent les processus électrochimiques, ce qui accroît la résistance interne. Par conséquent, la tension augmente en cas de hausse du passage du courant. Autrement dit, la batterie se vide plus rapidement et son rendement baisse. En outre, le temps de recharge des batteries se prolonge également. D'autre part, les véhicules électriques consomment nettement plus d'énergie en hiver qu'en été. Une quantité importante d'énergie est déployée pour chauffer l'habitacle, la vitre arrière, le pare-brise, la batterie et, le cas échéant, les sièges et le volant. Désormais, certains constructeurs équipent également leurs voitures électriques de pompes à chaleur (elles utilisent les rejets de chaleur des composants externes à la batterie), d'une isolation de la batterie et d'une option de préchauffage. L'ensemble de ces dispositifs augmentent l'autonomie des voitures électriques.

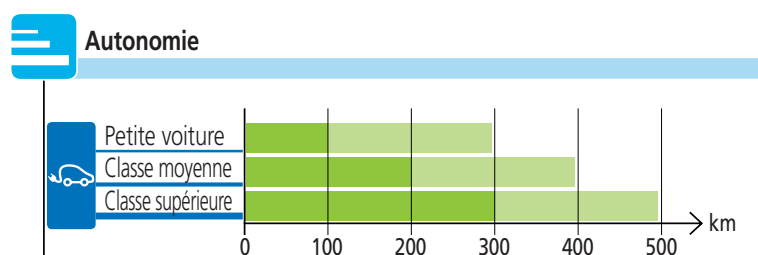
déterminant quant à l'autonomie selon une étude du centre de recherche Center Automotive Research (CAR).

D'après le graphique de la figure 7.1, les véhicules de la classe supérieure sont en mesure de couvrir des distances allant jusqu'à 500 km et leur autonomie moyenne avoisine les 300 km. Les voitures de classe moyenne atteignent une autonomie allant jusqu'à 400 km et parcourent une distance moyenne de 200 km. Les petites voitures, principalement utilisées en ville, disposent pour leur part de batteries dont les capacités sont nettement inférieures. Certains modèles proposent une autonomie de 300 km et la distance pouvant être parcourue avoisine généralement les 100 km. La plupart des véhicules électriques atteignent donc une autonomie comprise entre 100 et 300 km qui est inférieure à celle des véhicules à moteur à combustion conventionnels. Mais ce point ne revêt guère d'importance au quotidien étant donné qu'un modèle électrique parvient sans peine, en règle générale, à parcourir la même distance moyenne qu'une voiture de tourisme qui ne dépasse que rarement les 100 km.

D'après une étude actuelle du TCS, les progrès de la recherche dans le domaine des batteries ont permis de multiplier par plus de deux l'autonomie moyenne par charge de batterie pour tous les véhicules électriques en la faisant passer de 127 à 331 km entre 2015 et 2020. Les experts, quant à eux, ont bon espoir que cette tendance se poursuive.

Figure 7.1 : Autonomie en kilomètre

Contrairement aux apparences, le **poids du véhicule et son chargement ne jouent aucun rôle**



Source : Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE, 2019 | Les scénarios de la mobilité électrique en Suisse – mise à jour 2020. EBP, 2018 | Welche Reichweite hat ein Elektroauto?, E.ON Energie Deutschland GmbH | Lorenz Honegger. Der Preis für die Reichweite bei Elektroautos hat sich halbiert: Trotzdem lohnt sich der

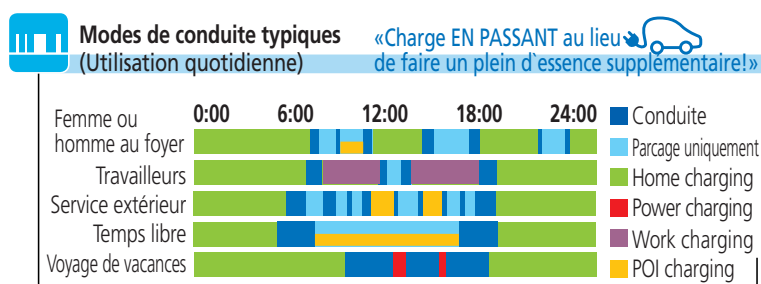
Kauf nicht für jeden, 03.08.2020 | Philipp Vetter. Leichtbauweise verbessert Ökobilanz von E-Autos kaum. Die Welt am Sonntag, 03.12.2017 | Tobias Stahl. Mega-Reichweiten-Test: Diese 20 Elektroautos fahren im Winter am weitesten. efahrer.com, 19.03.2020

7.1.2. Modes de conduite typiques (utilisation quotidienne)

«Charge en passant au lieu de faire un plein d'essence supplémentaire!»

Le graphique de la figure 7.2 illustre l'utilisation quotidienne d'un véhicule électrique représente aussi bien le comportement de conduite que le comportement de charge. Le comportement de charge révèle la fréquence de recharge et l'endroit où les véhicules électriques sont rechargés. Ce facteur détermine en fin de compte le succès d'un modèle économique incluant la mobilité électrique, ainsi que l'interaction avec le système d'électricité. Les BEV et les ICEV ont un point commun : ils sont essentiellement un objet «immobile» et non mobile si l'on considère le comportement de leurs conductrices et conducteurs en termes de mobilité. D'après le graphique, même les véhicules de conducteurs fréquents comme les collaborateurs de services externes restent sur leur place de stationnement ou dans le garage domestique pendant la majeure partie des 24 h de la journée. Quand les Suisses partent en vacances, un trajet long sollicite même moins le véhicule électrique que le stationnement. Étant donné qu'un voyage vers la destination de vacances se passe la plupart du temps sur les autoroutes, le véhicule est rechargé sur une station de recharge rapide. Le processus dit «power charging» ne joue en revanche aucun rôle notable en matière d'utilisation quotidienne.

Les modes de charge typiques sont caractérisés par le fait incontestable que le véhicule



électrique est rechargé le plus souvent à domicile pendant ses périodes de stationnement (home charging). À l'heure actuelle, la quasi-totalité des propriétaires de véhicules électriques possèdent une station de recharge privée à leur domicile, sur laquelle ils rechargent chaque jour de petites quantités d'électricité (besoins journaliers). En deuxième position vient la recharge sur la station privée de l'employeur (work charging). Ce type de recharge s'applique à l'ensemble des modes de conduite représentés sur le graphique. D'après les experts, cette situation ne connaîtra pas d'évolution importante, car 90 % des processus de charge s'effectueront également sur le lieu du domicile ou bien dans une entreprise. C'est la raison pour laquelle la planification d'infrastructures dans le domaine de la mobilité électrique se concentre sur l'augmentation du nombre de points de recharge sur des sites encore non aménagés comme les immeubles d'habitation et les terrains d'entreprises. Une station de recharge publique (POI charging) est sollicitée, si tant est que ce cas se présente, par des travailleurs très mobiles de services externes ou bien pour les déplacements de loisirs.

Conclusion : Les recharges sont bien moins souvent effectuées sur des stations de recharge publiques (POI et power charging) que sur des stations privées (home et work charging). Cette affirmation soulève les questions suivantes

Figure 7.2: Modes de conduite typiques

concernant la recharge de demain: quelle somme le conducteur d'un véhicule électrique est-il prêt à payer pour une puissance de charge élevée (recharge rapide) qui raccourcit sensiblement le temps de recharge? Les véhicules électriques seront-ils également rechargés sur des stations de recharge privées sachant que ce processus est le moins coûteux sur celles-ci? Les stations de recharge publiques entrent-elles uniquement en ligne de compte pour la recharge lorsque la batterie des véhicules est déjà presque vide? Où se trouvent les stations de recharge disponibles à des prix équitables pour les personnes qui ne peuvent procéder à un home charging ou à un work charging?

7.2. La mobilité en Suisse

7.2.1. Sur la route – comment?

Deux tiers des distances journalières moyennes de 37 km par personne (à partir de 6 ans) ont été parcourus avec la voiture par les Suisses en 2015 et un quart seulement avec

les transports publics. Ce chiffre parle de lui-même et prouve la nécessité de disposer d'un parc de véhicules privés compatible avec le climat, c'est-à-dire neutre en CO₂.

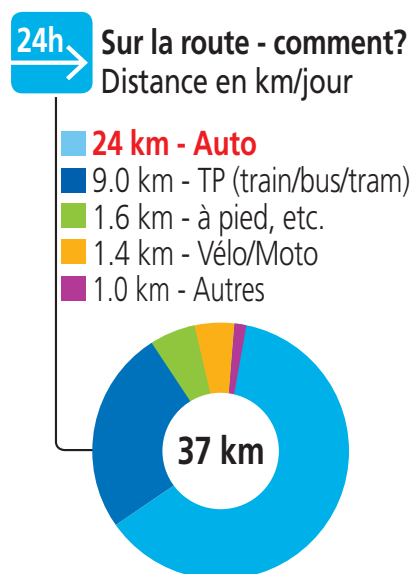
Les quelque 25 km parcourus par personne et par jour avec la voiture montrent clairement que les BEV actuels et leur autonomie comprise au minimum entre 100 et 300 km couvrent sans problème les besoins journaliers en mobilité de la plupart des Suisses. Même si la prestation de transport se répartit sur les quelque 4,7 millions de voitures de tourisme immatriculées en Suisse, ce ratio ne produit toujours qu'un trajet parcouru d'une cinquantaine de kilomètres par jour.

Le fait que les Suisses se déplacent le plus souvent avec un véhicule électrique a des répercussions immédiates sur le bilan climatique de la mobilité au quotidien. En revanche, la mobilité douce (piétons et cyclistes) et ses 8 % représentent une part relativement modeste.

Entre 1994 et 2015, la distance journalière moyenne par personne a progressé de 18 %. Cette augmentation est principalement due à la distance parcourue en train, qui s'est accrue de 77 % pendant cette période. Les distances parcourues par personne en voiture se sont certes stabilisées. Néanmoins, la population résidente suisse a connu une hausse et le trafic routier poursuit sa progression depuis 2000. En l'espace d'une quarantaine d'années, entre 1980 et 2018, la distance journalière parcourue par personne avec la voiture a augmenté de 52 % et le taux d'accroissement a même atteint 107 % dans le trafic ferroviaire grâce au développement des transports publics.

Source: Office fédéral de la statistique. *Mobilité et transports: Panorama*, mars 2020

Figure 7.3: Sur la route – comment?



7.2.2. Sur la route – à quelle fin ?

En 2015, une durée de 90 minutes environ était nécessaire pour couvrir la distance journalière de 37 km par personne. Les loisirs sont le principal motif de déplacement. Ainsi, 44 % des distances journalières en Suisse étaient effectuées pour les loisirs, 24 % pour le travail, 13 % pour les achats et 6 % pour la formation. Le travail représente le deuxième motif de déplacement le plus important, après les loisirs.

conséquent, la distance entre le domicile et le lieu de travail a également augmenté de 16 % entre 2000 et 2017.

Source : Office fédéral de la statistique. Mobilité et transports : Panorama, mars 2020

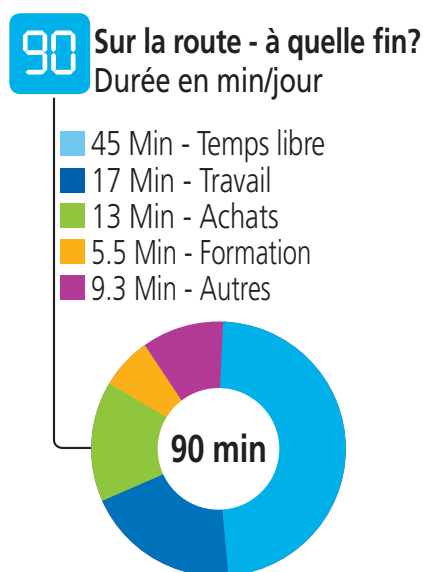


Figure 7.4: Sur la route – à quelle fin ?

Cette tendance s'observe également dans les statistiques sur les déplacements pendulaires. En 2017, 9 personnes actives occupées sur 10 en Suisse étaient des pendulaires. Autrement dit, leur lieu de travail se trouvait à l'extérieur de leur bâtiment d'habitation. Alors que la part des personnes actives occupées dans leur commune de domicile est passée de 59 % à 29 % entre 1990 et 2017, les pendulaires intercommunaux représentaient plus de deux tiers de la population active comptaient en 2017. Par

8. Caractéristiques spéciales

8.1. Bilan énergétique: cycle de conduite (tank-to-wheel)

(voir également les points 3.2, 5.1.2 et 5.1.3)

Si l'on compare le bilan énergétique des ICEV et des BEV en termes de cycle de conduite (tank-to-wheel), les véhicules électriques sortent grands vainqueurs étant donné qu'ils sont en mesure de récupérer 60 % de l'énergie de freinage en moyenne. En effet, les ICEV doivent pour leur part solliciter 100 % de l'énergie de freinage pour les freins et le moteur. La majeure partie des pertes d'énergie non récupérables de 40 % en moyenne sont dues à la propulsion avec 14 % ainsi qu'au moteur électrique ou au générateur et à la charge des batteries (10 % chacun).

8.2. Efficacité

8.2.1. Rendement

La même quantité d'énergie fournie (tank-to-wheel) permet à un BEV de parcourir une distance 3,5 fois plus importante que celle couverte par un ICEV (voir également le point 5.1 Efficacité énergétique).

8.2.2. Composants de propulsion

Le groupe motopropulseur des BEV présente une structure simple et se compose d'un nombre de composants dix fois inférieur à celui des ICEV nettement plus complexes (200 pièces contre 2000). Par conséquent, les garagistes voient leur modèle économique menacé, car un nombre inférieur de pièces mobiles est aussi synonyme d'usure réduite et d'interventions d'entretien nettement moins coûteuses pour les véhicules électriques (voir également le point 6.1 Coûts totaux (TCO)).

8.3. Stratégie énergétique CH 2050

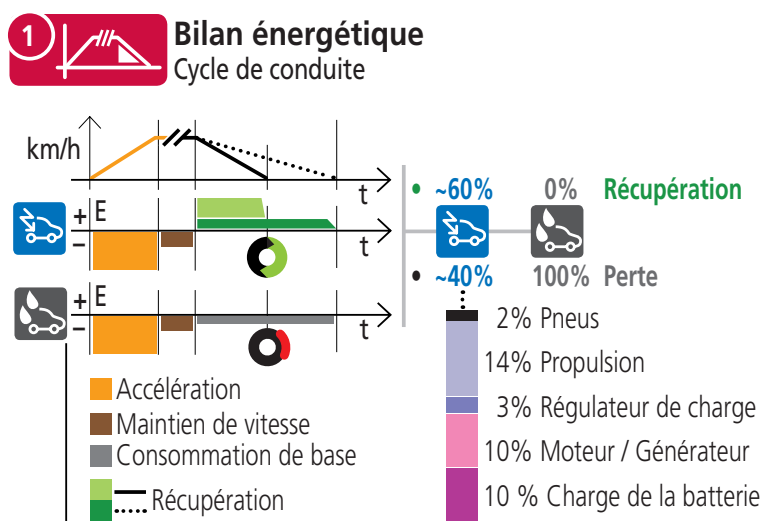
8.3.1. Sur site TOUJOURS sans émissions: Sans bruit, gaz d'échappement ni consommation d'air

La qualité de l'air et de la vie, notamment dans les grandes agglomérations à fort trafic s'améliore sensiblement grâce aux véhicules électriques qui ne produisent aucune émission directe de polluants sous forme de gaz d'échappement et qui génèrent nettement moins de bruit. Souvent employé dans le contexte de la mobilité électrique, l'expression de «véhicule zéro émission (Zero Emission Vehicle)» désigne une voiture électrique qui se déplace (tank-to-wheel) sans émettre le moindre gramme de CO₂.

8.3.2. Conduire avec CH-Energy – Une valeur ajoutée sur place

En 2019, la Suisse a consommé la majeure partie de son énergie sous forme de carburants (35,3 %). Le reste de sa consommation se répartit entre l'électricité (24,7 %), le gaz (13,8 %), les combustibles pétroliers (13,5 %) et les agents énergétiques restants, tels que le bois, les autres sources d'énergie renouvelables ou les déchets industriels (12,7 %). La consommation d'énergie de la Suisse se distingue par une

Figure 8.1 : Bilan énergétique



Autonomie avec 1kWh
(1kWh = 0.12l d'essence)

1kWh



1.5 km

5.1 km



Effacité

• **Moins de pièces mobiles - plus facile!**
Réduction de l'usure et des besoins d'entretien

«grande sécurité d'approvisionnement mais aussi par une forte dépendance vis-à-vis de l'étranger» étant donné que 75 % de l'énergie consommée en Suisse sont produits à l'étranger. Cette part d'énergie englobe l'ensemble des produits pétroliers, le gaz naturel, ainsi que les combustibles nucléaires utilisés dans les centrales nucléaires suisses.

La situation se présente sous un éclairage tout à fait différent en ce qui concerne les importations de l'étranger si l'on prend en considération l'origine de l'électricité produite. La Suisse a enregistré un excédent d'exportation d'électricité à quatorze reprises lors des vingt dernières années. Toutefois, l'état des approvisionnements en hiver brosse un autre tableau. Ces dix dernières années, la Suisse aura chaque hiver dépendu de ses importations d'électricité pour couvrir ses propres besoins énergétiques.

Une part de 99,8 % de l'énergie nucléaire fournie a été produite dans des centrales suisses en 2018 et leurs agents énergétiques ont tous dû être importés à 100 %. Les grandes centrales hydroélectriques suisses ont fourni 76 % de l'énergie hydraulique. Une part de 91 % des nouvelles énergies renouvelables (installations photovoltaïques, éolien, petite hydraulique, etc.) a été produite en Suisse et a bénéficié, à hauteur des trois quarts, d'un encouragement par le système de rétribution de l'injection (RPC/SRI/RU).

La mobilité électrique présente un degré de durabilité qui équivaut à celui de l'électricité requise issue des sources d'énergie renouvelables. Ni plus, ni moins, C'est la raison pour laquelle il est recommandé que son développement s'accompagne d'une contribution à la croissance des nouvelles énergies renouvelables au sens de la Stratégie énergétique

2050. Ce constat vise principalement l'encouragement de la production d'électricité photovoltaïque indigène. Un développement plus poussé de la force hydraulique actuellement prépondérante et de l'énergie éolienne utilisée de façon marginale fait face à des obstacles de différente nature, à commencer par la protection du paysage et de l'environnement. C'est précisément le degré élevé de développement de la force hydraulique qui n'entraîne qu'une augmentation limitée de l'offre d'électricité hydraulique par des moyens techniques.

Source: DETEC. Premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050. Fiche d'information «Approvisionnement énergétique de la Suisse et évolution au niveau international» OFEN. L'électricité consommée en Suisse en 2018 provenait à 74 % des énergies renouvelables, 17.02.2020 | OFEN. Statistique globale suisse de l'énergie 2019 | OFEN. Statistique suisse de l'électricité 2019

8.4. Confort de conduite

8.4.1. Silence: pas de bruit de moteur et de boîte de vitesses

En Suisse, 110 000 bâtiments, soit 1,2 million de personnes sont exposés à des nuisances sonores néfastes pour la santé ou fortement gênantes. Le principal responsable de ces émissions sonores est le trafic routier, qui nuit à la santé et engendre des coûts élevés supérieurs à 1,1 milliard de francs suisses pour l'économie du pays. Adopté par la Suisse, le règlement européen n° 540/2014 concernant le

Figure 8.2: Efficacité: comparaison

Figure 8.3: Stratégie énergétique 2050

Stratégie
énergétique
CH 2050



• **Sur site TOUJOURS sans émissions**
(SANS bruit / gaz d'échappement / consomm. d'air)



• **Conduire avec CH-Energy** Ma contribution! 2050





Figure 8.4 : Confort de conduite

niveau sonore des véhicules à moteur et des systèmes de silencieux de remplacement est entré en vigueur depuis l'été 2016 et prescrit des valeurs limites harmonisées pour les émissions sonores des véhicules à moteur. Ces valeurs devront être progressivement réduites d'ici 2026, afin de respecter une valeur maximale de 68dB pour un rapport puissance/masse de 120kW/1000kg des modèles neufs et de 72dB pour les voitures de sport puissantes (rapport puissance/masse supérieur à 200kW/1000kg).

En raison de l'absence de bruit de leurs moteurs, les véhicules électriques sont perçus comme nettement plus silencieux que les véhicules à moteur à combustion par les passagers, ce qui contribue à une amélioration du confort de conduite.

Le bruit au passage des ICEV se compose du bruit du moteur et du bruit de roulement dans les centres-villes. Dans le cas des BEV, il se limite au bruit de roulement. Le bruit du roulement des pneus sur la chaussée est donc produit quel que soit le type de propulsion et il constitue la principale source de bruit, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur du véhicule. Ce bruit présente un lien de causalité avec la vitesse. Autrement dit, il domine le bruit du moteur à une vitesse constante comprise entre 15 et 25km/h environ. À une vitesse supérieure comprise entre 30 et 45km/h environ, c'est le bruit du roulement des pneus sur la chaussée qui prend le dessus. Ce n'est qu'à des vitesses supérieures à l'extérieur des villes (entre 80 et 100km/h environ) que le bruit de vent finit par se superposer au bruit du roulement des pneus sur la chaussée. Par conséquent, le bruit des moteurs à combustion ne revêt une certaine importance qu'au démarrage.

Une propulsion électrique est nettement plus silencieuse qu'une propulsion conventionnelle à moteur à combustion. Les propulsions électriques permettent de réduire le bruit surtout dans les cas de circulation discontinue en centre-ville. En outre, le bruit au démarrage des véhicules de plus grande taille comme les bus et les camions-poubelles constitue une nuisance considérable et peut être réduit de façon significative par les propulsions électriques.

Dans le contexte d'une électrification croissante de la mobilité, la diminution du bruit du roulement des pneus sur la chaussée permettrait en premier lieu de continuer à réduire les émissions sonores. C'est précisément le couple élevé au démarrage qui génère, à la surface de contact du pneu, des crissements plus importants et donc plus bruyants. Les revêtements de routes optimisés et peu bruyants apportent une contribution essentielle à la réduction du bruit routier, notamment sur les autoroutes, et sont également de plus en plus utilisés aussi à l'intérieur des localités.

Par ailleurs, les véhicules électriques sont pour ainsi dire devenus victimes de leur succès étant donné que leur propulsion, quasi silencieuse dans les zones à vitesse limitée à 30km/h est susceptible de créer des situations dangereuses dans un contexte de mobilité douce et en particulier pour les malvoyants. Afin d'écarter ce danger potentiel, le règlement européen n° 540/2014 exige que tous les véhicules électriques et hybrides neufs soient équipés en Suisse d'un système d'avertissement acoustique (Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS)) à partir de 2022. Ce dispositif émet un signal avertisseur au démarrage du véhicule jusqu'à une vitesse de 20km/h, ainsi qu'en marche arrière. Les modèles plus anciens ne sont soumis à aucune obligation de rééquipement. Les acci-

dentologues de la compagnie d'assurance AXA recommandent aux propriétaires d'une voiture électrique silencieuse de l'équiper d'un générateur de bruit pour que les autres usagers de la route puissent entendre le véhicule.

Source: Oliver Krauss. Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch von Fahrzeugluftreifen, 2018 | Peter Zeller (éd.). Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. 2012 | Hanspeter Gloor. Linderung für Lärmgeplagte in Umwelt Aargau n° 65, 2014.

8.4.2. Manipulation simplifiée: «Conduite à une pédale» et conduite anticipative

La technique du **One-Pedal-Driving** est de plus en plus utilisée dans le domaine de la mobilité électrique. Nissan ne l'a pas inventée, mais le constructeur japonais a été le premier à la mettre en œuvre de façon cohérente. Dans le langage courant, l'expression «One-Pedal-Driving» désigne une conduite à une seule pédale, laquelle promet plus de confort et d'efficacité. La vitesse n'est plus contrôlée que par une pédale électrique qui permet d'accélérer et de freiner. Si le conducteur lève le pied de la pédale électrique, alors le véhicule freine automatiquement jusqu'à son immobilisation. Afin de procéder à une accélération, le conducteur appuie sur la pédale électrique, qui est en fait une pédale d'accélérateur adaptée. En cas d'urgence, une pédale de frein demeure toujours disponible.

La technique du One-Pedal-Driving présente l'avantage d'autoriser le freinage du véhicule au moyen de la pédale électrique. Ce système préserve les disques et les plaquettes de frein qui disposent par conséquent d'une durée de vie nettement plus longue. La récupération partielle de l'énergie de freinage permet d'économiser de l'électricité et de l'argent et constitue

donc le deuxième avantage de cette technique. Ainsi, le moteur électrique passe en mode générateur et transforme l'élan du véhicule en une électricité qui servira ultérieurement à son accélération. Les véhicules électriques se distinguent par une récupération efficace de l'énergie cinétique qui serait sinon rejetée sous forme de chaleur.

La conduite sûre et économe en énergie d'un véhicule électrique est souvent liée au terme de **conduite anticipative**, un principe essentiel de la sécurité routière en règle générale. Un conducteur prévoyant ou défensif reconnaît à l'avance les dangers de la circulation routière auxquels il sera en mesure de réagir de façon appropriée. Il prévoit les erreurs des autres usagers de la route et respecte la distance de sécurité requise.

Une conduite anticipative est synonyme de conduite non seulement sûre mais aussi d'une conduite économe en énergie. La possibilité de réagir avec un temps d'avance à certains dangers permet d'éviter notamment un freinage d'urgence. En outre, chaque coup de frein évité économise de l'électricité. Les techniques anticipatives comme celles consistant à laisser rouler le véhicule avant une intersection, un arrêt ou un obstacle, portent aussi leurs fruits dans le cas de la voiture électrique. Il est recommandé de freiner en premier lieu au moyen de la récupération et non pas avec le frein normal. Un freinage régulier permet de récupérer environ 60 % de l'énergie cinétique et de la stocker dans la batterie. En cas de freinage très brusque, une partie de l'énergie sera en revanche transformée en une chaleur qui sera perdue.

Source: Die Welt. One-Pedal-Driving im E-Auto, 21.03.2018 | Stefan Heimann. Vorausschauend fahren und Sprit sparen. co2online.de

8.4.3. Chauffage/refroidissement sans moteur – Avant même de partir... partout...

Gestion thermique

La gestion thermique désigne la commande de courants thermiques dans les véhicules au moyen d'une adaptation optimale du système HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning). Une gestion performante du froid et de la chaleur revêt une importance considérable pour les BEV étant donné qu'elle optimise la thermorégulation du véhicule de manière à ne pas entraîner trop de pertes d'autonomie, tout en garantissant le confort dans l'habitacle et le refroidissement et chauffage de tous les composants.

Conditionnement thermique des composants d'un véhicule électrique

La batterie de traction doit thermiquement être conditionnée étant donné que la température de service optimale en termes de rendement doit être de 20°C. Si elle descend en dessous du point de congélation, les performances de la batterie baisseront sensiblement, de même que l'autonomie en raison d'une atténuation des réactions chimiques. Les températures supérieures à 30°C provoquent un vieillissement précoce de la batterie. Cette dernière subit des dommages irréversibles à partir d'une température de 40°C. Outre la batterie, la température du moteur électrique, de l'électronique de puissance et des chargeurs doit également être régulée, afin que le véhicule électrique puisse rouler en présentant un rendement particulièrement élevé. Les plages de températures idéales sont aussi nombreuses que les composants et constituent un défi de taille à relever.

Climatisation de l'habitacle

La production de la puissance de chauffage et de refroidissement pour l'habitacle et les fonc-

tions de sécurité importantes comme le désembuage et le dégivrage des vitres, constitue un autre défi à relever pour les véhicules électriques. En raison de leur faible rendement, les moteurs à combustion génèrent de nombreux rejets de chaleur susceptibles de servir à chauffer l'habitacle. En revanche, les propulsions électriques, économes en énergie, ne rejettent que peu de chaleur perdue dans l'environnement et nécessitent des chauffages d'appoint. Le chauffage et la climatisation sont susceptibles de réduire l'autonomie d'un véhicule en raison de leur consommation d'énergie importante. Désormais, des pompes à chaleur économes en énergie sont utilisées, afin que le conducteur ne se pose plus la question de savoir s'il va avoir trop chaud ou trop froid ou pouvoir conduire. En outre, elles peuvent également servir pour la climatisation pendant l'été. Par ailleurs, les voitures électriques passent souvent leurs périodes de stationnement sur les stations de recharge. Celles-ci permettent de chauffer ou de refroidir le véhicule avant le début du trajet, et ce, sans solliciter la batterie. Une application pour smartphone offre également la possibilité de télécommander le chauffage ou le refroidissement du véhicule. L'exécution de ces processus à distance permet de nettement réduire la consommation d'électricité, ce qui a un effet positif sur l'autonomie.

Conclusion: Les systèmes de gestion thermique des véhicules électriques sont généralement plus complexes que ceux des véhicules conventionnels à moteur à combustion étant donné que différents composants aux besoins en température les plus divers doivent être pris en considération. Ainsi, le moteur électrique et l'électronique de puissance doivent être refroidis en permanence alors que la batterie, elle, doit être refroidie ou chauffée en fonction des situa-

tions. En outre, les rejets de chaleur d'un moteur à combustion ne sont plus disponibles pour chauffer l'habitacle. Désormais, ce sont des dispositifs économes en énergie comme une pompe à chaleur qui remplissent cette fonction.

Sources: *Thermomanagement in Elektro- und Hybridfahrzeugen. hellacom | Malte Westerloh. Analyse des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von Elektrofahrzeugen, 2019*

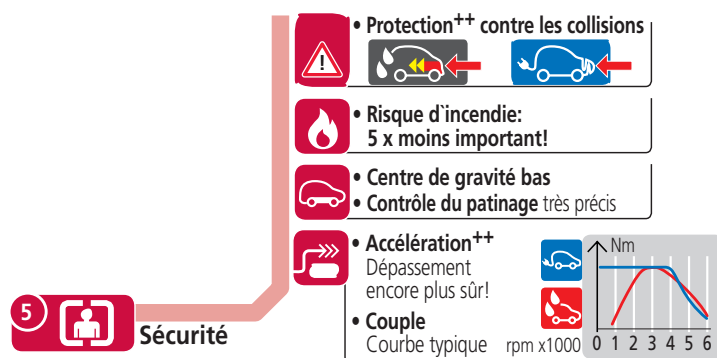
8.5. Sécurité

Quel que soit leur type de propulsion, les véhicules doivent, pour obtenir leur immatriculation, tous satisfaire aux mêmes standards minimaux définis par la loi. Dans le cas des BEV, les composants spécifiques de la propulsion électrique posent de nouveaux défis. Ce point concerne en particulier les batteries, qui requièrent une protection complète afin d'empêcher toute inflammation ou tout choc électrique.

Les voitures électriques se distinguent des voitures conventionnelles notamment dans les aspects suivants, qui peuvent avoir un impact sur les accidents.

– La fréquence des sinistres des voitures électriques dépend de la classe des véhicules.

La fréquence moyenne des sinistres des véhicules électriques est comparable à celle des voitures à propulsion conventionnelle. Le bilan des sinistres offre une interprétation différente si l'on considère les chiffres séparément en fonction de la classe du véhicule. Les petites voitures électriques causent 10 % de sinistres en moins que les voitures à moteur à combustion de cette même catégorie. Les accidents sont plus fréquents dans le cas de véhicules électriques de la classe supérieure. D'après les spécialistes, l'accélération des voitures électriques de cette catégorie explique en partie ce phénomène.



– Avoir des connaissances spécifiques sur le véhicule devient de plus en plus important

Toute personne qui a suivi une formation à la conduite traditionnelle avec un ICEV est en mesure de conduire sans problème tout BEV imposant de nouvelles exigences à la conductrice et au conducteur.

Figure 8.5: Sécurité

Afin de bien maîtriser un véhicule électrique, il est recommandé de prendre le temps de se familiariser avec ses caractéristiques spécifiques, notamment en ce qui concerne le comportement à l'accélération et au freinage. Dans un premier temps, il est judicieux d'accélérer avec grande précaution. En outre, un véhicule électrique ralentit bien plus fortement qu'un véhicule traditionnel lorsque la pédale d'accélérateur est relâchée. Ce geste déclenche en outre le processus permettant de récupérer une partie de l'énergie cinétique. Un nombre important de conducteurs de voitures électriques se voient donc contraints d'adapter leur style de conduite lorsqu'ils passent à ce type de véhicule. Par ailleurs, un démarrage silencieux requiert une attention supérieure de la part de tous les usagers de la route.

- En tant que conductrice ou conducteur d'un BEV, il est nécessaire d'avoir conscience que sa propulsion électrique à peine audible est susceptible de présenter un danger pour les piétons et autres usagers de la route qui se fieraient au bruit du moteur.
- La bonne attitude à adopter avec les systèmes d'assistance à la conduite doit faire l'objet d'un apprentissage.
- Les systèmes d'assistance à la conduite ne constituent pas un paramètre spécifique aux véhicules électriques. En effet, ils sont dis-

ponibles sur tous les modèles modernes, et ce, quel que soit leur type de propulsion. Toutefois, ils sont plus souvent utilisés par des conducteurs de voitures électriques férus de technologies.

D'après plusieurs études, les systèmes d'assistance à la conduite comme l'assistance au freinage d'urgence et le programme électronique de stabilité (ESP) contribuent certes à la prévention des accidents. Ce qui, toutefois, ne libère pas le conducteur de son obligation légale d'être en permanence concentré sur le trafic, car tous les systèmes d'assistance actuellement disponibles doivent faire l'objet d'une surveillance permanente. Une confiance aveugle dans la technique (over-reliance) provoque de temps à autre des accidents.

Source: Anna Ehrensperger. E-Crash – Mobilité électrique. axa.ch, 22.08.2019 | ADAC. Wie sicher sind Elektroautos bei Brand, Unfall oder Panne?, 08.05.2020

8.5.1. Protection contre les collisions

Jusqu'à présent, les crash tests réalisés avec des véhicules électriques par l'organisme de contrôle Euro NCAP n'ont pas encore recensé un échec parmi les véhicules testés. En raison de leur architecture optimisée en matière de collision, les BEV présentent souvent de meilleures performances de sécurité que les ICEV. D'une manière générale, les accidents survenant avec une voiture électrique ne sont pas plus dangereux que ceux impliquant un véhicule à moteur à combustion. Les deux types de propulsion doivent satisfaire à des normes minimales de sécurité identiques (airbags, habitacle rigide, etc.) et sont soumis aux mêmes contrôles de sécurité que ceux du crash test de l'organisme Euro NCAP.

Étant donné que le principal danger provient d'un endommagement de la batterie, les constructeurs consentent de nombreux efforts techniques afin de protéger contre toute déformation les packs de batteries logés dans le dessous de caisse des véhicules. En outre, les composants électriques doivent également être dimensionnés de façon à présenter une «sécurité intrinsèque». Autrement dit, le système à haut voltage doit être coupé automatiquement en cas de forte collision. Au cours de ce processus, la batterie est séparée des autres composants et câbles à haut voltage. Les renseignements relatifs au système de propulsion électrique font partie des informations clés pour les organisations de sauvetage et il est recommandé de les mentionner sur la fiche de secours (notamment via un QR Code), que l'on peut placer sous le pare-soleil côté conducteur.

8.5.2. Risque d'incendie 5 x moins important

Tandis que dans le cas de moteurs à combustion le principal risque d'incendie est une fuite de carburant, dans celui de véhicules électriques la batterie lithium-ion peut s'enflammer en cas d'accident. Il est en revanche très rare qu'une inflammation spontanée de la batterie se produise sans influence externe provoquée par un défaut technique pendant le trajet, à l'arrêt ou durant la recharge. Même la recharge d'un véhicule électrique dans un garage souterrain ne présente aucun risque d'incendie. Bien entendu, cette absence de risque ne peut être garantie que si l'installation de l'infrastructure de recharge a été réalisée par un spécialiste.

Par ailleurs, une déformation de la batterie peut devenir critique. En effet, ce phénomène est susceptible de causer un emballement thermique (thermal runaway). Autrement dit, la batterie se met à prendre feu. Un feu de batterie peut se déclarer sur le lieu de l'accident ou quelques

jours après. Pour l'instant, aucune disposition légale ne régit le transport et le stockage d'un véhicule électrique accidenté.

Conseil pratique : Il est recommandé de ne pas garer un véhicule accidenté à proximité de bâtiments ou d'autres véhicules.

L'hypothèse selon laquelle il serait absolument impossible d'éteindre une batterie lithium-ion en feu n'est pas tout à fait juste. En effet, d'immenses quantités d'eau permettent de refroidir le foyer d'incendie jusqu'à ce qu'il soit possible d'interrompre la propagation du feu de cellule en cellule. Étant donné que les batteries sont bien blindées et scellées, il est très difficile, sur le terrain, d'approcher l'eau à proximité suffisante de la cellule afin de produire l'effet de refroidissement nécessaire le plus vite possible. Par ailleurs, les BEV brûlent nettement moins souvent que d'autres types de véhicule.

Source : Martin Schatzmann. Wenn ein Elektroauto brennt. NZZ, 18.04.2018

8.5.3. Centre de gravité bas – Contrôle du patinage très précis

Les batteries qui alimentent le moteur électrique en électricité présentent un poids important et sont intégrées dans le plancher du véhicule. C'est pour cette raison que le centre de gravité de la voiture est très bas et proche de la route et que des forces centrifuges moins élevées sont exercées. Ces facteurs permettent aux BEV d'obtenir une bonne tenue de route, perceptible surtout à grande vitesse et dans les virages.

La régulation de l'antipatinage ou contrôle de traction est un système d'assistance à la conduite qui veille à ce que les roues ne tournent pas dans le vide en cas d'accélération

sur une chaussée humide ou verglacée. Ce dispositif repose sur la détection des vitesses des roues par les capteurs du système antiblo-cage (ABS), qui parviennent à identifier si une roue motrice adhère ou patine. En cas de patinage, l'antipatinage bride la puissance du moteur jusqu'à ce que les réduits transmettent à nouveau leur force maximale. Le contrôle de traction garantit la stabilité de conduite au démarrage, c'est à dire au moment où la masse inerte du véhicule est mise en mouvement, ainsi que dans les virages et d'une manière générale, dans des situations de conduite critiques. Étant donné que le moteur électrique réagit bien plus rapidement aux signaux de l'antipatinage, via l'adaptation de la puissance, que le moteur à combustion, les pneus d'un BEV moderne s'usent moins vite que ceux d'un ICEV.

8.5.4. Accélération (dépassement encore plus sûr) – Couple (courbe typique)

Le graphique de la figure 8.5 indique clairement que les véhicules électriques atteignent le couple maximal en cas d'accélération au démarrage, car ils ne requièrent qu'une petite vitesse de rotation à cette fin. Étant donné que la majeure partie de ces véhicules ne dispose que d'une seule vitesse, ils peuvent également accélérer sans interruption due au changement de vitesse. Les BEV sont en mesure de procéder à une accélération très rapide tout en maintenant son intensité, et ce, quelle que soit la vitesse de rotation. C'est la raison pour laquelle leur manœuvre de dépassement a tendance à offrir une sécurité supérieure. Tout conducteur d'un ICEV puissant souhaitant obtenir un couple maximal avec un BEV doit faire preuve de plus de patience afin d'atteindre une vitesse de rotation élevée qui s'accompagne d'une consommation, d'une vibration et de nuisances sonores plus importantes.

9. Electricité / Approvisionnement

Sources: Avis du Conseil fédéral, 16.05.2018. Interpellation 18.3329 Doris Fiala. Tensions entre la mobilité électrique et la Stratégie énergétique 2050 | Urs W. Muntwyler. Elektromobile machen das Autofahren günstiger. NZZ, 03.09.2020 | SC-CER Mobility. Auf dem Weg zu einem energieeffizienten und klimafreundlichen Schweizer Mobilitätssystem. White Paper, 2017 | OFEN. Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2018 nach Verwendungszwecken, 2019 | OFEN. Stratégie du programme SuisseEnergie 2021 à 2030, 16.12.2019 | Helmut Stalder. Warum neue Atomkraftwerke in der Schweiz als Lösung für die Klimafrage ungeeignet wären. NZZ, 23.06.2019 | Jürg Rohrer. Ausbau der Stromproduktion aus Photovoltaik in der Schweiz. Bedarf, Potential und Umsetzung, juillet 2020

9.1. Demande d'énergie e-mobile CH

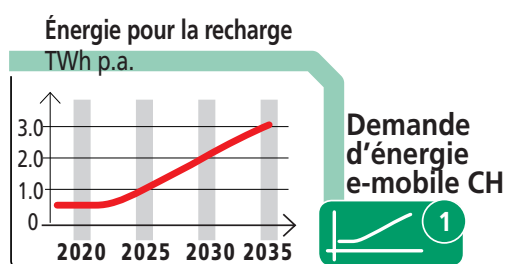
L'ensemble des scénarios d'avenir prévoient une pénétration croissante du marché par les véhicules électriques. Cette tendance se traduit également par une hausse des besoins en électricité (voir graphique de la figure 9.1). D'après les perspectives énergétiques de l'OFEN, 10 % des véhicules seront des BEV ou des PHEV en Suisse entre 2029 et 2033. Pour sa part, McKinsey table notamment sur une part de voitures électriques de tourisme de 40 % pour 2050.

À l'heure actuelle, la mobilité électrique consomme approximativement 140 GWh par

an en Suisse, soit 0,2 % de la consommation d'électricité totale. D'ici 2025, la demande d'énergie va être multipliée par un facteur compris entre 6 et 7. Selon les prévisions, 3,5 TWh d'électricité seront demandés dix ans plus tard. En 2050, les besoins en électricité à long terme pour la mobilité électrique atteindront les 6,3 TWh en fonction du scénario retenu.

Si 10 % des véhicules passaient tous à une propulsion par batterie conformément aux prévisions de l'OFEN, ils solliciteraient alors 1 % à 2 % de la production d'électricité suisse à l'heure actuelle. En parallèle, cette évolution permettrait d'économiser 360 millions de litres de carburants fossiles et 830 000 tonnes de CO₂. Si la totalité des 4,7 millions de voitures actuellement immatriculées en Suisse étaient des véhicules électriques, l'électricité nécessaire à celles-ci équivaldrait aujourd'hui à 20 % de la consommation d'électricité totale. Dans le même temps, cette dernière serait fortement réduite et trois millions de tonnes de gazole et d'essence seraient également économisés étant donné que les BEV ne consommeraient qu'un tiers de l'énergie pour leur conduite par rapport aux ICEV. Rien que la consommation d'énergie well-to-tank nécessaire au transport des carburants fossiles en direction des stations-service suisses affiche un niveau important. Après tout, notre pétrole provient de pays comme le Kazakhstan, le Nigeria et la Libye. D'après le physicien Axel Krause, la réduction des importations de pétrole amortirait en dix ans les investissements de vingt milliards de francs suisses qui seraient indispensables à la couverture des besoins supplémentaires en électricité de la mobilité électrique par l'exploitation d'installations photovoltaïques sur des bâtiments. En outre, une part importante des fonds économisés pour le pétrole circulerait ainsi dans l'économie locale afin d'installer les installations solaires requises.

Figure 9.1 : Demande d'énergie e-mobile Suisse



9.2. Stratégie énergétique 2050 / MoPEC

Les objectifs d'émissions fixés par le protocole de Kyoto de 1997, la loi sur le CO₂ (depuis 2000), l'accord de Paris sur le climat de 2015 et la Stratégie énergétique 2050 revêtent une importance capitale pour la politique climatique de la Suisse à l'échelle internationale et nationale. D'après les prévisions du protocole de Kyoto de 1997, la Suisse doit, d'ici 2030, réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 50 % par rapport à 1990. Entièrement révisée, la loi sur le CO₂ a pour but d'accélérer ce changement également en Suisse. Adoptée par le Parlement suisse au mois de septembre 2020, elle sera votée en 2021. La révision de la loi prévoit des mesures de réduction des émissions de CO₂ comme une taxe sur les billets d'avion, l'essence et le mazout et un Fonds pour le climat, qui sera redistribué aux habitants de la Suisse. Ces processus montrent que l'abandon du pétrole, du gaz et du charbon et la fin de l'ère fossile ont également commencé en Suisse. Selon les tout derniers résultats de la recherche, le CO₂ fait un pas dans la bonne direction, car une politique fondée sur des mesures d'incitation s'avère nettement moins coûteuse que des subventions.

D'après la nouvelle loi sur le CO₂, les valeurs cibles de CO₂ seront encore renforcées pour la majorité des véhicules neufs, et ce, de manière similaire aux pratiques de l'UE. Désormais, les objectifs ne s'appliqueront pas uniquement aux voitures, aux véhicules de livraison et aux semi-remorques mais aussi aux poids lourds. Les importateurs devront payer une taxe d'incitation sur le CO₂ lorsque leur flotte de véhicules neufs dépassera les valeurs cibles. A l'avenir, les fabricants et les importateurs de carburants fossiles devront compenser plus d'émissions de CO₂ et une grande partie dans le pays. Par conséquent, le

prix du litre d'essence et de gazole devrait augmenter de 12 centimes à partir de 2025.

L'objectif consiste à garantir une mobilité conforme aux dispositions du protocole de Kyoto et de l'accord de Paris sur le climat, qui sera mise en œuvre par la Stratégie énergétique 2050 à l'échelle de la Suisse. Afin de pouvoir respecter le budget de CO₂ convenu pour réaliser l'objectif de deux degrés de la Suisse (réchauffement climatique <+2°C), il serait nécessaire de réduire les émissions annuelles de CO₂ du transport individuel motorisé (TIM) de 80 % d'ici 2050 d'après les calculs du SCCER Mobility. Le TIM ne devrait plus rejeter de CO₂ à partir de 2060. Selon Urs W. Muntwyler, professeur de photovoltaïque à la Haute école spécialisée bernoise BFH, la Stratégie énergétique 2050 constitue un premier pas vers la décarbonation de l'économie énergétique en Suisse. Celle-ci est réalisable d'ici 2050, mais elle exige notamment le remplacement des véhicules à propulsion fossile par des véhicules électriques, ainsi qu'une maîtrise de la demande et une augmentation de l'efficacité des propulsions et des véhicules grâce au progrès technologique.

En raison des nouvelles connaissances scientifiques acquises par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le Conseil fédéral a décidé au mois d'août 2019 de renforcer cet objectif. À partir de 2050, la Suisse ne produira plus d'émissions de gaz à effet de serre. L'électrification progressive et la substitution des carburants et combustibles fossiles dans le domaine des transports et de la production de chaleur généreront la décarbonation de la consommation d'énergie.

MoPEC 2014 (modèle de prescriptions énergétiques des cantons)

Le MoPEC a pour but d'harmoniser les 26 législations cantonales dans le domaine du bâtiment. La version actuelle du modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC 2014) permet de viser une réduction considérable de la part des chauffages fossiles, qui s'élève toujours à 60 %. À cet égard, il convient de prendre en compte que la chaleur ambiante constitue le deuxième groupe de consommation finale d'énergie le plus important après la mobilité. En 2019, une part de 29,8 % de la consommation d'énergie suisse a été déployée à des fins de chauffage et de climatisation (40 % avec la production d'eau chaude) et 37,7 % pour la mobilité. Le MoPEC 2014 ne présente toutefois un caractère obligatoire qu'à partir du moment où les cantons ont adapté leurs lois sur l'énergie en conséquence. Cependant ce cas se présente uniquement dans un tiers des cantons et le délai visé du 1^{er} janvier 2020 n'a pu être tenu. Le MoPEC actuel prête à controverse sur le plan politique, et ce, principalement en raison de l'obligation de poser des installations solaires sur des bâtiments à construire et celle d'assainir les chauffages. Plusieurs modules complémentaires ont déjà été introduits dans plus de 80 % des cantons.

D'après l'art. 1.27 (module de base, section E, MoPEC 2014), les bâtiments à construire

doivent satisfaire à l'exigence minimale suivante en matière d'autoproduction d'électricité: l'installation de production d'électricité installée dans, sur ou à proximité du bâtiment doit générer au moins 10W/m² de surface de référence énergétique, mais sans imposer une puissance supérieure à 30kW.

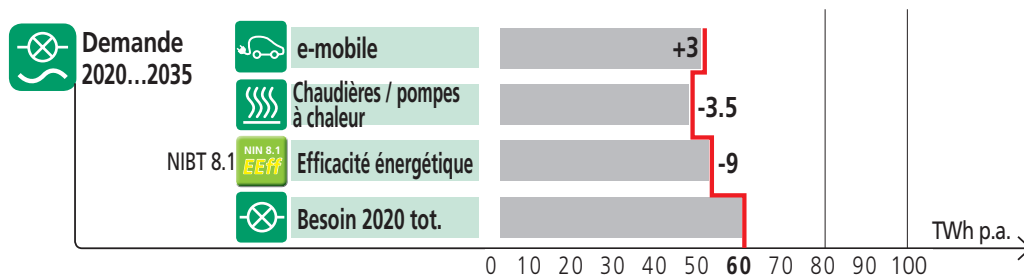
La surface de référence énergétique (Ae) est la somme de toutes les surfaces de plancher des étages et des sous-sols qui sont inclus dans l'enveloppe thermique et dont l'utilisation nécessite un chauffage ou une climatisation.

D'une manière générale, le mode de production d'électricité, soit une installation photovoltaïque, une installation de couplage chaleur-force (CCF) ou une autre technologie, peut être défini par le propriétaire du bâtiment. Autrement dit, ce point n'est soumis à aucune restriction d'un point de vue technologique.

9.2.1. Demande 2020 ... 2035

Avec une part de 37,7 % de l'énergie finale totale, le secteur suisse de la mobilité constitue le principal consommateur énergétique dans notre pays. Dans ce domaine, 70 % des besoins en énergie sont consommés par le transport individuel motorisé alors que 16 % de l'énergie sont déployés pour le transport de marchandises par route.

Figure 9.2 : Demande d'énergie



À en croire les sceptiques, la Suisse serait quasi plongée dans le noir dès que toutes les voitures rouleront à l'électricité; les besoins en électricité causés par la mobilité électrique seraient trop importants, et ce, d'autant plus que les trois centrales nucléaires restantes ne seront probablement pas remplacées et qu'une lacune de production d'électricité due à leur arrêt se profile à l'horizon. En réalité, les véhicules électriques sollicitent le réseau électrique dans des proportions bien plus faibles que ce que certains voudraient faire croire. Les experts fondent de grands espoirs sur le perfectionnement technique des propulsions électriques et notamment des batteries qui devraient garantir que la consommation d'électricité des voitures électriques continue de baisser et que la récupération d'énergie s'améliore. Si toutes les voitures roulent à l'électricité, nous serons en mesure de renoncer à une grande partie de l'infrastructure de recharge pour les carburants fossiles. Ainsi, la plupart des raffineries (en Suisse, la raffinerie de Cressier est la seule encore en service) et les 3362 stations-service actuellement recensées dans notre pays, n'auraient plus besoin de consommer de l'électricité.

La politique énergétique suisse a pour objectif d'accroître l'efficacité énergétique et la part des énergies renouvelables avec une combinaison de mesures de nature réglementaire, financière et facultative, et d'ainsi mettre en œuvre le mandat constitutionnel dans les domaines de l'énergie et du climat, la Stratégie énergétique 2050 et la loi sur l'énergie (LEne, RS 730.0). Le graphique de la figure 9.2 indique clairement que le remplacement des chauffe-eau purement électriques par des chauffe-eau à pompe à chaleur nettement plus efficaces, qui soutirent l'énergie de chauffage de l'environnement, ferait plus que compenser les

éventuels besoins supplémentaires en électricité générés par la mobilité électrique. Le potentiel d'économie ainsi obtenu serait susceptible d'équivaloir à une puissance annuelle allant jusqu'à 3,5 TWh et il ne prend pas encore en compte la réduction des besoins en électricité allant jusqu'à 9 TWh par an grâce à des mesures d'efficacité complémentaires dans les entreprises, dans les bâtiments et dans le secteur public. Dans le domaine de la mobilité, l'énergie déployée à cette fin pourrait également être utilisée d'une manière plus efficace, et ce, non seulement par le remplacement des ICEV par les BEV, mais aussi par une réorientation plus marquée du transport individuel motorisé vers les transports publics dont le rendement énergétique est supérieur.

L'étude du centre de compétences SCCER Mobility se montre plus sceptique quant à la demande croissante d'électricité à des fins de mobilité individuelle. Elle conclut que les besoins en électricité supplémentaires d'une flotte uniquement composée de BEV seraient considérables et que leurs émissions totales dépendraient fortement de l'empreinte carbone du courant utilisé. Les auteurs de cette étude soulignent que les transports sont le seul secteur en Suisse qui a consommé une part d'énergie sans cesse croissante au cours des trente dernières années. D'après le contenu de cette publication, cette tendance ne s'est essoufflée que durant ces dernières années. Le centre de compétences SCCER Mobility est sur la même longueur d'onde que l'Office fédéral du développement territorial (ARE) et ses prévisions actuelles qui continuent de supposer une demande croissante du nombre de véhicules-kilomètres en Suisse. Toutefois, la fourchette des estimations est importante et le taux d'accroissement évolue entre 0 % et 40 %.

9.2.2. Production 2020 ... 2035

Les véhicules électriques constituent un élément clé de la décarbonation de l'approvisionnement en énergie car ils contribuent à la réduction de la combustion de carburants fossiles et à la baisse des émissions de CO₂. Cependant les véhicules électriques consomment également de l'énergie pour alimenter leur propulsion. Toutefois, les propriétaires de véhicules sont en mesure de choisir la provenance des agents énergétiques du courant de leur voiture selon le produit électrique qu'ils achètent (mot clé : mix électrique).

Sur le long terme, la fourniture du courant nécessaire à la mobilité électrique peut être assurée en premier lieu par des augmentations d'efficacité dans d'autres secteurs, par le développement de nouvelles énergies renouvelables et par les innovations techniques dans ce domaine. La Suisse fonde de grands espoirs sur le développement du photovoltaïque qui fera plus que combler la lacune d'approvisionnement due à l'arrêt des centrales nucléaires (voir graphique de la figure 9.3). À titre d'exemple, une installation photovoltaïque de 20 m² est en mesure de produire une électricité solaire suffisante pour une autonomie allant jusqu'à 18 000 km par an.

La détermination du nombre d'heures d'ensolaillement s'accompagne toujours d'une certaine incertitude. En outre, la production et la consommation d'électricité surviennent rarement en même temps. Toutefois, le principe vehicle-to-grid (V2G) permet aux véhicules électriques d'apporter une solution au problème étant donné que leurs batteries stockent l'électricité ou la réinjectent dans le réseau et contribuent ainsi à la régulation de celui-ci. De plus, ils peuvent également piloter la production locale d'énergie renouvelable dans l'intérêt d'un sys-

tème vehicle-to-home (V2H). La voiture électrique se prête particulièrement bien à cette fin. Une voiture de tourisme reste garée pendant 90 % de la journée en moyenne. Si elle est raccordée à une borne de recharge ou à une prise, le surplus d'énergie produit par une installation photovoltaïque peut alimenter la batterie durant cette période. Par la suite, cet excédent sera réinjecté dans le réseau électrique. «À l'avenir, les voitures électriques feront partie de l'écosystème des services de mobilité et d'énergie. Nous pourrions les recharger avec les cellules solaires installées sur le toit des maisons et les batteries serviront de réservoir intelligent pour le réseau énergétique.» (Prof. Dr. Stefan Bratzel, directeur du Center of Automotive Management (CAM) de Bergisch Gladbach).

Plus les véhicules électriques serviront de système de stockage et fonctionneront de manière bidirectionnelle, mieux la mobilité sera associée aux entreprises d'électricité qui fourniront également de l'énergie pour la mobilité individuelle. Elles seront en mesure de rentabiliser l'association de ces modèles économiques afin d'intégrer encore mieux les nouvelles énergies renouvelables dans le réseau. Une telle évolution permettra donc de continuer à améliorer l'intégration du réseau et la rentabilité de la mobilité électrique. Toutefois, la bidirectionnalité en matière de recharge est un principe qui n'est encore guère répandu. Autrement dit, son potentiel de développement est, à cet égard, important.

Si la mobilité électrique connaît une phase de croissance, la sollicitation des réseaux de distribution suit également cette tendance en raison de la hausse de la consommation d'électricité et des pointes de charge supérieures. D'une manière générale, il est supposé que les réseaux seront capables de couvrir la demande

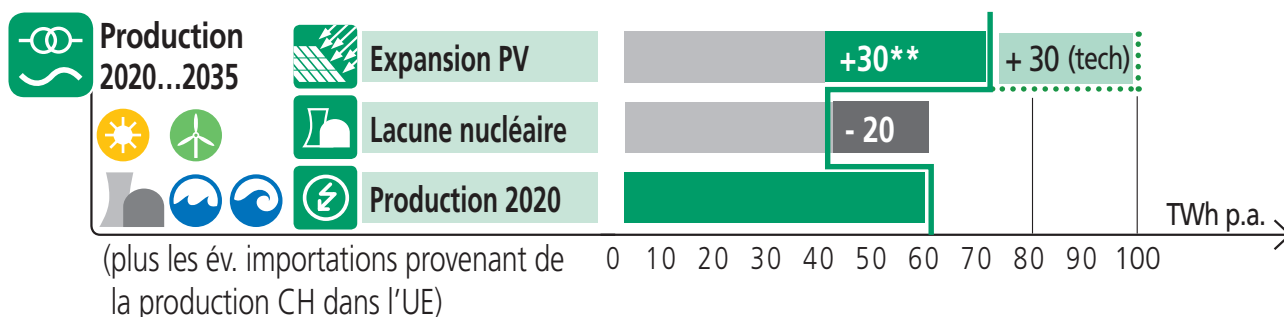


Figure 9.3 :
Prévisions pour la
production d'énergie

supplémentaire à court et moyen terme. Une extension ciblée du réseau, des commandes de charge intelligentes et les «smart grids» sont éventuellement indispensables afin d'éliminer toute congestion possible du réseau susceptible d'être causée par des pics de demande. Une commande intelligente permettra à la mobilité électrique de lisser les pointes de charge et d'améliorer la flexibilité au sein du système (voir également le point 10.2). L'encouragement légal de solutions intelligentes (compteurs intelligents, systèmes de régulation et de commande) prévu par la Stratégie énergétique 2050 offre pour sa part la possibilité de piloter la sollicitation du réseau de façon à pouvoir éviter son extension conventionnelle et plus coûteuse. L'augmentation du nombre de véhicules électriques sur les routes suisses constitue cependant la priorité numéro un et, bien entendu, cette évolution ne va pas devenir réalité du jour au lendemain. La production de l'énergie électrique nécessaire à ce processus et sa distribution via le réseau pourront donc être progressivement adaptées à la nouvelle demande.

Lacune d'approvisionnement due à l'arrêt des centrales nucléaires

L'arrêt progressif des centrales nucléaires suisses en raison de leur vétusté, va entraîner la perte de quelque 25 TWh d'électricité au cours des vingt prochaines années, soit une part de 40 % de la capacité de production. Un pourcentage substantiel du courant fourni provient de sources nucléaires, notamment pendant l'hiver.

Le débat suisse sur le climat fait résonner avec plus d'intensité les voix appelant à la levée de l'interdiction de construction de nouvelles cen-

trales nucléaires, un processus considéré comme moyen de décarbonation de l'approvisionnement en énergie et d'élimination des pénuries d'électricité en hiver. Pour construire une nouvelle centrale nucléaire en Suisse, il serait préalablement nécessaire de lever l'interdiction de construction de nouvelles centrales décidée dans le cadre de la Stratégie énergétique et acceptée par le peuple en mai 2017. En outre, les exploitants de centrales nucléaires ont retiré leurs demandes de construction de nouvelles centrales en 2016 et ne semblent pas disposés à revenir sur cette décision, pour des raisons financières et politiques.

D'après l'OFEN, l'approvisionnement en électricité est sécurisé jusqu'en 2035 sous réserve de remplir les conditions suivantes: l'accord sur l'électricité permet de réussir l'intégration dans le marché européen de l'électricité, l'efficacité énergétique est améliorée et la part des énergies renouvelables augmente. Selon la même institution, l'accord sur l'électricité offre à la Suisse des conditions identiques à celles des pays de l'UE en ce qui concerne l'accès au marché intérieur de l'électricité et donc celui au commerce de l'électricité et des capacités de transport. Une telle libéralisation du marché permettrait de mieux coordonner la production et la demande d'électricité. Toutefois, l'accord-cadre doit d'abord être signé entre la Suisse et l'UE avant que l'accord sur l'électricité n'arrive sur la table des négociations.

Expansion PV (développement du photovoltaïque)

D'après l'OFEN, 75 % des émissions de gaz à effet de serre suisses sont dues à l'énergie et principalement issues de la combustion d'agents énergétiques fossiles. Ainsi, seul un

approvisionnement en énergie exempt de ressources fossiles (ou décarboné) permettra à la Suisse d'atteindre ses objectifs climatiques. Par ailleurs, il est recommandé de couvrir les besoins croissants en électricité en augmentant la production intérieure et non plus les importations étant donné que les pays voisins visent également une décarbonation de leur approvisionnement en énergie. Selon les acteurs de la recherche énergétique, les installations photovoltaïques présentent de loin le plus grand potentiel à exploiter afin d'augmenter la production d'électricité et d'accroître au maximum l'autosuffisance de la Suisse avec son propre courant. Néanmoins, la Suisse a perdu sa première place initiale en matière d'énergie solaire. Désormais, la totalité des panneaux solaires posés fournissent une puissance avoisinant les 2,5 GW, ce qui équivaut à 4 % des besoins en électricité de la Suisse. En Allemagne, les chiffres sont multipliés par deux. Autrement dit, les installations photovoltaïques allemandes couvrent 8 % des besoins.

D'après les estimations de l'OFEN, le potentiel de production d'électricité solaire inexploité par les bâtiments suisses s'élève à 67 TWh par an (toits: 50 TWh, façades: 17 TWh), soit 110 % de la consommation d'électricité du pays. En outre, Swissolar identifie également un potentiel supplémentaire de 15 TWh par an en dehors des bâtiments (couvertures de places de stationnement, de zones de stockage ou de stations d'épuration, aires de circulation, talus d'autoroute, etc.). Selon l'OFEN, les zones qui ne présentent aucun conflit de surface sont celles qui se prêtent le mieux à cette fin. Cette institution précise également que la pose d'installations solaires sur des surfaces cultivables présente un caractère plutôt problématique en Suisse, en raison de la densité de population. D'après ces

calculs, la Suisse serait en mesure de produire jusqu'à 82 TWh par an d'électricité solaire. Ainsi, le photovoltaïque fournirait la majeure partie de l'électricité du pays. La transition énergétique deviendrait réalité, car l'énergie nucléaire serait remplacée. Afin de pouvoir réaliser cet objectif, il serait nécessaire d'accélérer la pose d'installations photovoltaïques en multipliant leur nombre par quatre. La mise en œuvre d'un tel processus demanderait aux acteurs énergétiques suisses de consentir un effort supplémentaire considérable. Les acteurs politiques, pour leur part, adopteraient des mesures réglementaires supplémentaires, telles qu'une obligation de poser une installation solaire sur les bâtiments existants ou des directives adressées aux cantons en matière de production d'énergies renouvelables. En outre, les innovations relatives aux technologies photovoltaïques (rendement supérieur, durée de vie plus importante des cellules solaires et amélioration du stockage d'électricité) permettent également d'accroître la production d'électricité solaire. De plus, une taxation des émissions de CO₂ serait susceptible d'augmenter les moyens financiers alloués à la recherche et au développement d'installations photovoltaïques plus puissantes et performantes.

Production 2020 ... 2035 (60 TWh p. a.)

Les symboles représentés dans le graphique de la figure 9.3 illustrent le mix électrique actuel de la Suisse qui se compose de sources d'énergie renouvelables et non renouvelables. Dans le cas d'une sortie complète du nucléaire et d'une extension du photovoltaïque, il serait également dépendant des centrales hydroélectriques utilisables de manière flexible.

10. Charge

Étant donné que notre réseau électrique fonctionne avec un courant alternatif (AC) et que les batteries des véhicules ne peuvent être rechargées qu'avec un courant continu (DC), il est donc toujours nécessaire de transformer le courant alternatif en courant continu. Il existe deux possibilités qui permettent d'approvisionner le véhicule électrique en énergie électrique à partir du réseau à courant alternatif :

1. Charge AC (chargeur on-board)

Dans le cas de la charge en courant alternatif, l'énergie électrique est d'abord transmise du réseau électrique au véhicule via une, deux ou trois phases. La transformation du courant alternatif en courant continu s'effectue dans un second temps à l'intérieur du véhicule même. Le chargeur intégré dans le véhicule est généralement relié au réseau à courant alternatif via un équipement d'alimentation électrique (station de recharge AC, Wallbox, etc.) et prend en charge le redressement du courant alternatif en courant continu. Le transfert d'énergie entre le réseau à courant alternatif et le véhicule à batterie s'effectue par conduction (câble). L'électronique de charge (Battery Management System, BMS) commande et surveille la charge en fonction de la température, du niveau de charge et de la tension des batteries.

En théorie, la charge AC est limitée à une puissance maximale de 43 kW. Dans la pratique, une limitation de la charge AC à 11 kW fait ses preuves pour que les transformateurs AC-DC ne soient ni trop lourds ni trop coûteux. Les stations de recharge AC présentent l'avantage de n'engendrer que des coûts faibles au regard des stations de recharge DC. Les stations de recharge AC se prêtent en premier lieu aux processus de home charging et de work charging. Mais elles conviennent aussi aux stations de recharge publiques (POI charging).

2. Charge DC (chargeur off-board)

Dans le cas de la charge DC, la transformation AC-DC s'effectue déjà à l'intérieur de la station de recharge à laquelle le chargeur est intégré. Par conséquent, les charges DC ne requièrent aucun transformateur dans la voiture. Cependant elles nécessitent l'utilisation d'un câble de charge qui relie le véhicule à la station de recharge. Une interface de communication spécifique entre la voiture et la station de recharge commande le processus de charge. À la différence de la charge AC, la charge DC permet de générer des puissances de charge supérieures, allant jusqu'à 150 kW. Certaines stations de recharge DC sont même capables de fournir jusqu'à 350 kW. Cependant, les stations de re-

Connexion	1	Type	Typ 13/23	CEE 16/3	CEE 16/5	Typ 2	CCS
P _{kW}		Puissance kW	1.8	3.7	11	22	≥ 50
Tuyaux vides Ø mm				25 (1x16A)	25 (3x16A)	40 (3x32A)	50 (3x80A)
photo des contacts							
t _{charge} pour 100km				6h	2h	1h	~15Min
		 Sur-charge				Standard	

Figure 10.1 : Types de connexion

charge DC sont relativement coûteuses à l'achat. En outre, leur raccordement au réseau électrique entraîne des frais initiaux élevés et le refroidissement de la station de recharge, par exemple, engendre également des coûts d'exploitation importants. Afin de pouvoir rentabiliser une infrastructure de recharge DC, il sera même à l'avenir nécessaire de l'installer en priorité dans des endroits publics et bien fréquentés.

Par ailleurs, il convient de prévoir qu'un nombre croissant de BEV seront, à l'avenir, en mesure de procéder à des charges AC et DC.

Charge conductive ou inductive / Remplacement des batteries

La charge par câble (conductive) constitue actuellement la norme dans le domaine de la mobilité électrique.

Il est également possible de procéder à une charge inductive (sans câble) similaire au transfert d'énergie appliqué aux brosses à dents électriques, aux plaques de cuisson ou aux smartphones. La charge inductive utilise le principe de l'induction électromagnétique afin de transférer sans contact l'énergie électrique de l'infrastructure de recharge au véhicule électrique. Toutefois, la charge inductive des BEV n'en est encore qu'au stade de son développement et présente plusieurs inconvénients au regard d'une connexion par câble directe. En effet, les pertes de charge sont plus importantes et la puissance chargée est plus faible. L'infrastructure de recharge se compose d'un raccordement au réseau, d'un dispositif de charge équipé d'un onduleur et d'une plaque de charge fixe avec une bobine primaire qui permet de générer un champ magnétique alternatif. Le véhicule électrique contient une bobine secondaire (pick-up) et un redresseur. Une tension électrique est induite par

le champ alternatif dans la bobine secondaire. Cette tension est transformée par le redresseur en un courant continu nécessaire à la recharge de la batterie à haut voltage du véhicule.

Dans un souci d'exhaustivité, ce point aborde également la question du remplacement des batteries. Ainsi, la batterie déchargée est retirée du véhicule et remplacée par une batterie chargée. Cette possibilité d'approvisionnement en énergie des véhicules à batterie ne constitue toutefois, à ce jour, qu'un phénomène marginal.

10.1. Connexion

D'une manière tout à fait générale, il est possible d'affirmer qu'«une prise» est disponible en principe partout pour recharger les véhicules électriques. Les quatre types de recharge courants (modes) sont décrits en détail dans la brochure «Créer le contact». Aux États-Unis et dans d'autres pays, la notion de «level» 1 à 3 est employée au lieu de celle de mode 1 à 4. L'état de la technique d'une installation de recharge est expliqué dans la partie 7.22 «Alimentation des véhicules électriques» de la NIBT et détaillé dans l'article de Thomas Hausherr «Fehlerstrom-Schutzeinrichtungen (RCD) nachrüsten – Empfehlungen und Pflichten bei Altbauten» («Dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) – recommandations et obligations pour les bâtiments anciens») paru dans la revue spécialisée ET (04/2016).

Le tableau de la figure 10.1 illustre les liens entre la technologie de raccordement et de charge, la puissance de charge potentielle et la durée de recharge. Les temps de recharge varient très fortement en fonction de la capacité de la batterie. Une durée de recharge moyenne de 6 à 8 heures suffit pour recharger complètement une batterie «vide». D'une manière générale, une charge complète du BEV constitue une exception. Dans la

plupart des cas, seule l'énergie nécessaire pour parcourir une distance journalière moyenne est rechargée. Si l'utilisateur parcourt une distance d'environ 40 km par jour, une durée de recharge comprise entre 3 et 4 heures devrait donc être suffisante en cas de charge monophasée. Dans le cas précis des véhicules électriques équipés de batteries aux capacités supérieures ou compatibles avec la recharge rapide, la durée de recharge est considérablement réduite par une charge AC triphasée ou par une charge DC d'une puissance plus importante.

Les différents types de recharge de véhicules électriques (modes de charge) se distinguent par leur source de courant, la puissance de charge maximale et les possibilités de communication entre le véhicule et la station de recharge. La norme EN 61851-1 (chap. 7.22.2.4, NIBT) différencie les quatre types de recharge suivants:

Mode 1 (courant alternatif)

- Raccordement du véhicule électrique au réseau à courant alternatif au moyen de prises monophasées ou triphasées normalisées du côté réseau.
- Courant de charge: $\leq 16\text{ A}$ (prise industrielle CEE) / $\leq 8\text{ A}$ (prise domestique type 13)
- Tension: monophasé $\leq 250\text{ V}$ / triphasé $\leq 480\text{ V}$
- Le chargeur pour ce mode de charge se trouve dans le véhicule (chargeur on-board).

Mode 2 (courant alternatif)

- Raccordement du véhicule électrique au réseau à courant alternatif au moyen de prises monophasées ou triphasées normalisées du côté réseau. Appareil de commande (in-cable control box) avec une fonction de conduite à pilote de commande (fonction pilote) et à un dispositif de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) entre le véhicule électrique et la fiche.

- Courant de charge: $\leq 32\text{ A}$ (prise industrielle CEE) / $\leq 8\text{ A}$ (prise domestique type 13)
- Attention: respecter les prescriptions des distributeurs. Elles prévoient des courants monophasés jusqu'à 16 A au maximum!
- Tension: monophasé $\leq 250\text{ V}$ / triphasé $\leq 480\text{ V}$
- Le chargeur pour ce mode de charge se trouve dans le véhicule (chargeur on-board).

Mode 3 (courant alternatif)

- Raccordement du véhicule électrique au moyen d'un dispositif de charge prévu à cet effet; la fonction pilote de commande (fonction pilote) s'étend jusqu'au dispositif de charge. Le dispositif de charge doit être relié à demeure au réseau à courant alternatif.
- Le chargeur pour ce mode de charge se trouve dans le véhicule (chargeur on-board).

Mode 4 (courant continu)

- Raccordement du véhicule électrique au moyen d'un chargeur externe dans lequel la fonction pilote de commande (fonction pilote) s'étend jusqu'au dispositif de charge. Le dispositif de charge doit être relié à demeure au réseau à courant alternatif.
- Le chargeur pour ce mode de charge se trouve dans la borne de recharge (chargeur off-board).

Le terme «communication» implique dans la mobilité électrique deux opérations séparées:

1. La communication dans les modes 2, 3 ou 4 se réfère à des informations relatives à la transmission d'énergie et touchant à la sécurité, telles que l'intensité du courant ou la surveillance du conducteur de terre entre le véhicule et la prise.
2. La «High level communication» superposée au signal du mode peut contenir par exemple des informations pour l'utilisateur, l'identification, des données de décompte et bien d'autres renseignements.

Types de charge (modes)		Charger AC ~			Charger DC =	
		1	2	3	4 - DC	4 - DC high
Alimentation Tension U (V), phases Courant I (A) Puissance P (kW)		230V ~ 8 A 1.8 kW	230V ~ 16 A 3.6 kW 400V ~ 16 A 11 kW	230V ~ 16 A 3.6 kW 400V ~ 32 A 22 kW*	150...400V + adaptive jusqu'à 150 kW	150...800V + adaptive jusqu'à 300 kW
Lieu de charge Home charging POI charging Work charging Power charging		 ou 	 ou 	 ou 	 ou 	 ou 
Connexion CEE 16/5 type 13 type 23 COMBO CEE 16/3		 ou 	 ou 	 ou 	 ou 	 ou 
Véhicule type 2 COMBO						
Communication / Contrôle CP Control Pilot («Low level» fonctions) PLC Power Line Communication («High level» fonctions)		individuel	Control Pilot (CP)	Control Pilot (CP) (High level PLC) Accès au réseau	OCPP pour la compensation Control Pilot (CP) High level PLC Accès au réseau	OCPP pour la compensation Control Pilot (CP) High level PLC Accès au réseau
Temps de charge pour 20 kWh (env. 100 km)		-	11 h 6 h 2 h	6 h 1 h	24 Min (50 kW) 8 Min (150 kW)	24 Min (50 kW) 8 Min (150 kW)
Note... RCD type B, ou EV ou type A plus détection DC ICCPD In Cable Control and Protective Device		-	Ne convient pas à un fonctionnement continu	* exige au véhicule 400V / 3ph	Capacité de charge en fonction de l'état du véhicule et de la batterie	Capacité de charge en fonction de l'état du véhicule et de la batterie

Figure 10.2: Caractéristiques e-mobile
Types de recharge (modes)

Les prises de courant domestiques ne présentent pas une résistance mécanique et thermique suffisante. Les prises industrielles dites «prises CEE», quant à elles, proposent une résistance supérieure. Elles conviennent à une exploitation permanente pendant plusieurs heures et leur usage est avant tout recommandé pour la recharge de voitures et motos électriques.

Les véhicules à batterie sont rechargés par défaut au moyen du type de recharge (mode) 3 ou 4. Les types de recharge 3 et 4 reposent sur une infrastructure tout particulièrement construite pour les véhicules électriques. Ils offrent un haut niveau de sécurité électrique et de protection de l'installation contre les surcharges (protection incendie). Le verrouillage des connecteurs de charge est disponible pour tous les types de recharge. Ce dispositif offre une protection supplémentaire contre tout contact et toute manipulation par des tiers. Dans le cas de la recharge rapide en courant continu, les systèmes CHAdeMo (véhicules asiatiques) et Combo CCS (véhicules européens) sont utilisés la plupart du temps. L'abréviation CHAdeMo puise son origine dans la langue anglaise «Charge de Move» («se recharger pour se déplacer») et japonaise («une tasse de thé pendant la recharge?») et fait allusion au fait que la recharge ne dure pas plus longtemps que la dégustation d'une tasse de thé. Le nombre de véhicules nouvellement disponibles à l'achat et dotés du standard CHAdeMo n'a cessé de diminuer au cours des deux dernières années. Les nouvelles évolutions comme la charge sans câble (inductive) sont déjà intégrées dans de petites séries.

Sources : *Electrosuisse, e-mobile et AES (éd.). Créer le contact. Mobilité électrique et infrastructure, 2015 | Thomas Hausherr. Fehlerstrom-Schutz-ein-*

richtungen (RCD) nachrüsten – Empfehlungen und Pflichten bei Altbauten. ET 04/2016

10.2. Gestion de la charge

D'une manière générale, les véhicules électriques peuvent être rechargés à tout moment de la journée. Il peut toutefois être moins coûteux de reporter la consommation principale d'énergie aux heures nocturnes par des mesures de contrôle appropriées qui permettent de gérer la charge. A ce moment, l'offre d'électricité est plus élevée étant donné que la plupart des récepteurs ne fonctionnent pas. Une recharge nocturne et lente permet de moins solliciter le réseau électrique, d'éviter les pics de charge et de réaliser des économies (tarif heures creuses).

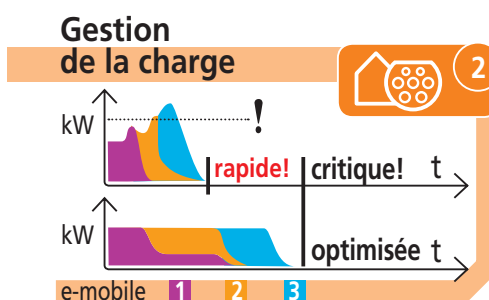


Figure 10.3: Gestion de la charge

Le développement des énergies renouvelables et un bon maillage européen du réseau permettent de répondre aux besoins en électricité accrus de la mobilité électrique (voir section 9 Electricité/Approvisionnement). Par ailleurs, les besoins en puissance revêtent une importance pratiquement supérieure à la demande d'électricité. En effet, l'exécution des processus de charge exige pendant une courte période la fourniture de puissances de charge très élevées qui sollicitent les niveaux de réseau inférieurs du réseau électrique, à savoir le réseau de distribution. La mise à disposition d'une infrastructure de recharge couvrant l'en-

semble du territoire influe sur les charges des réseaux électriques. Si un grand nombre de BEV sont rechargés sur une seule station de réseau local, cette situation est alors susceptible de générer des surcharges locales sur le réseau à basse tension en cas de charge non pilotée. Afin d'agir contre un tel effet, les EAE seront, à l'avenir, en mesure de bloquer les recharges en heures pleines.

Le nombre réduit de connexions destinées aux BEV est déjà susceptible de causer une surcharge du raccordement d'immeuble disponible. La gestion de la charge peut représenter une solution différente ou complémentaire au renforcement du raccordement au réseau. Elle définit divers paramètres pour les processus de recharge comme la puissance maximale ou l'établissement de priorités. Selon le nombre de voitures électriques et leur puissance requise, il peut s'avérer judicieux de ne pas recharger simultanément tous les véhicules et de ne pas générer un pic de charge important (voir graphique de la figure 10.3). C'est la raison pour laquelle il convient de tenir compte des limites de puissance du raccordement d'immeuble et de la commande des charges par l'EAE lors de la planification, et ce, afin d'éviter tout pic de charge (Smart Grid). Si deux points de recharge ou plus sont raccordés au même endroit (immeubles d'habitation, places de stationnement privées ou publiques, etc.), les «conditions techniques de raccordement» (CTR) de l'Association des entreprises électriques suisses (AES) recommandent d'installer un système intelligent de gestion de la charge pour les stations de recharge. Un tel dispositif (smart charging system ou load management system) est employé afin d'éviter des pics de consommation sur le réseau de distribution.

La recharge courte et progressive de petites quantités d'électricité constitue également la

tendance majeure à moyen et long terme pour les stations de recharge à domicile et sur le lieu de travail. Par conséquent, le smart charging (recharge intelligente), soit le décalage des processus de charge dans le temps, présente un potentiel important. Un Home Charge Device (HCD) offre, lui, un confort plus agréable au conducteur et il s'adapte également aux limites de puissance de l'infrastructure de réseau existante. Un compteur électrique intégré en option fournit des informations relatives à la consommation d'énergie. D'autres appareils de commande, tels qu'une minuterie et une régulation du tarif associée à un bouton de commande destiné à la connexion journalière, autorisent une recharge minutée de la batterie, et ce, notamment pendant les heures creuses (off-peak). Plusieurs dispositifs HCD peuvent être raccordés au même câble d'alimentation.

Les aspects les plus importants d'un système de gestion de la charge sont les suivants :

La **puissance disponible pour la recharge** est obtenue par le calcul de la différence entre la puissance maximale pouvant être prélevée dans le réseau et la puissance des autres charges reliées au compteur commun. En l'absence d'un système de gestion des recharges, les véhicules chargeraient à la puissance maximale permise par les stations de recharge, et ce, indépendamment de la réserve de puissance disponible.

Compte tenu de la puissance disponible, les **méthodes de gestion de la charge** sont basées sur le contrôle de la puissance (on/off ou régulation du niveau de la puissance) et/ou sur la programmation de la charge. Une régulation cyclique est également possible lorsque la charge disponible ne suffit pas pour recharger plusieurs voitures simultanément. La première voiture est chargée à une certaine puissance

pendant une période donnée. Dès que le temps est écoulé, la recharge de la deuxième voiture se lance. Une fois arrivé au dernier véhicule, le même processus redémarre avec le premier jusqu'à ce que tous les véhicules soient complètement rechargés

Gestion de la charge statique ou dynamique pour plusieurs stations de recharge

Dans le cas de la gestion statique, un contingent d'électricité fixe est déterminé pour la recharge des véhicules électriques. Celui-ci est ensuite réparti à parts égales entre toutes les voitures à recharger. La puissance disponible ne dépend pas des autres consommateurs (autres habitants de l'immeuble) ni de la production d'énergie renouvelable.

La gestion de la charge est dite dynamique (intelligente) lorsque la puissance disponible s'adapte en permanence à la consommation des autres utilisateurs et/ou à la quantité d'énergie renouvelable produite localement. Au cours de ce processus, la consommation d'électricité de l'ensemble de l'immeuble est mesurée en temps réel. La priorité numéro un des consommateurs est toujours accordée au bâtiment, soit aux habitations, aux lave-linge, à l'éclairage, à l'ascenseur et à bien d'autres récepteurs. Le «courant restant» peut être ensuite réparti entre les véhicules électriques. Certes, la gestion dynamique est plus coûteuse que son pendant statique. Mais elle présente l'avantage d'être plus flexible. En effet, elle est en mesure de mieux exploiter toute la puissance disponible et de réagir à des situations de charge imprévues ou à des difficultés d'approvisionnement en énergie.

Avantage de la gestion de la charge

C'est précisément dans les immeubles de grande taille que la gestion de la charge permet

d'éviter ou tout du moins de réduire les pics de charge, ainsi qu'une surcharge de l'installation électrique. Ce processus présente l'avantage de diminuer les coûts étant donné qu'il rend superflu un dimensionnement onéreux du raccordement au réseau et de l'installation électrique en fonction d'une pointe de puissance rarement nécessaire.

La gestion de la charge contribue à améliorer l'utilisation des énergies renouvelables. Une intégration dans un système de gestion de l'énergie domestique peut se révéler rentable afin d'utiliser l'électricité solaire produite par son installation photovoltaïque. Les batteries stationnaires de l'installation photovoltaïque permettent de stocker l'énergie solaire dans la cave jusqu'à ce que cette énergie soit nécessaire à la recharge de la batterie. Ainsi, la mobilité électrique apporte sa contribution à l'optimisation de la consommation propre en augmentant la part d'électricité solaire utilisée à cet effet (voir également le point 9.2.2).

Source: Der Technische Leitfaden. Ladeinfrastruktur Elektromobilität. Version du 3 janvier 2020 | Protoscar, IFEC. Guide d'installation de systèmes de recharge pour véhicules électriques, 2019

10.3. Charge Pertes de charge

Dans le domaine de la consommation d'électricité, l'efficacité énergétique du moteur électrique ne constitue pas le seul facteur déterminant. En effet, «faire le plein» génère également des pertes de charge. Autrement dit, la consommation est supérieure à l'énergie qui parvient en fin de compte jusqu'à la batterie. L'énergie se perd dans l'installation électrique située en amont et dans la station de recharge, ainsi que dans le chargeur de bord du véhicule et dans la batterie de traction. En raison des pertes de



Figure 10.4: Charge

charge, l'affichage de la borne de recharge indique un nombre de kilowattheures supérieur à celui calculé à partir des données de l'ordinateur de bord concernant l'autonomie et la consommation d'électricité moyenne.

Les pertes sont générées avant tout lors de la recharge aussi bien entre le point de raccordement de la Wallbox et la fiche du boîtier de batterie, mais aussi à l'intérieur de la batterie même. L'impossibilité de transporter l'électricité sans produire de pertes s'explique par la présence d'une résistance électrique spécifique des matériaux utilisés dans les câbles et les lignes, tels que les fils de cuivre. Dans la batterie, des pertes de charge apparaissent lors de la transformation du courant alternatif en un courant continu dans le redresseur qui travaille toutefois à un rendement supérieur à 98 %. En outre, la résistance interne de la batterie lithium-ion constitue un facteur supplémentaire à prendre en compte étant donné que celle-ci entraîne également des pertes d'énergie et qu'elle augmente au fil du temps.

Une part comprise entre 10 % et 20 % de l'énergie de sortie est rejetée sous forme de chaleur dans le système de refroidissement du véhicule ou dans l'air ambiant. Autrement dit, une part comprise entre 80 % et 90 % de l'énergie de sortie est fournie au moteur électrique sous forme d'énergie utile. Les pertes générées par la recharge rapide en courant continu et des puissances de charge élevées ne sont guère plus importantes. Certes, ce processus produit une quantité de chaleur supérieure qui exige parfois un refroidissement par liquide des câbles de charge. Toutefois, cette production de chaleur est due à la circulation d'une quantité d'énergie nettement plus élevée à travers les conducteurs pendant une brève période.

En fin de compte, les pertes de charge liées aux véhicules électriques sont pratiquement inévitables. Leur niveau dépend de différents facteurs, tels que la longueur et la section des câbles, la température et de la charge de la batterie. La consommation normalisée des véhicules électriques définie par la directive CEE prend en considération les pertes de charge, car l'électricité fournie est mesurée en amont du chargeur.

Source: Johannes Winterhagen, Bisschen Verlust ist immer, FAZ, 26.03.2020

10.3.1. Parcs de recharge

Les emplacements équipés d'une infrastructure de recharge pour les véhicules électriques sont utilisés lorsqu'ils sont bien accessibles, disponibles et clairement identifiés en tant que tels. Leur marquage efficace et leur usage exclusivement réservé aux véhicules électriques permettent d'assurer un taux d'utilisation élevé du parc de recharge. Dans le cas d'une non-application d'une signalisation claire, les places de recharge risquent de servir de places de stationnement. En outre, les personnes en infraction ne pourraient pas être sanctionnées.

La signalisation recommandée inclut la signalisation verticale et horizontale.

Signalisation verticale

– **Sur place:** Elle est composée d'un panneau de stationnement ou d'interdiction et d'un panneau complémentaire qui indique clairement que la place est réservée uniquement aux véhicules électriques en charge. Sur le panneau complémentaire seront indiqués un logo de voiture électrique de couleur noire et, éventuellement, le temps d'arrêt maximum.

- **Panneaux de signalisation** : Les indications pour les stations de recharge publiques le long des routes nationales utilisent les symboles internationaux qui représentent graphiquement deux stations de recharge avec le sigle EV.



Signalisation horizontale

Il est recommandé de bien délimiter la surface de la place de stationnement en la rendant très facilement repérable visuellement afin d'éviter le stationnement illégal de voitures conventionnelles.

Vert RAL 6018 : processus de charge ≤ 50 kW

Bleu RAL 5015 : processus de charge > 50 kW

Source : Protoscar, IFEC. Guide d'installation de systèmes de recharge pour véhicules électriques, 2019 | OFEN Tendances du marché 2020

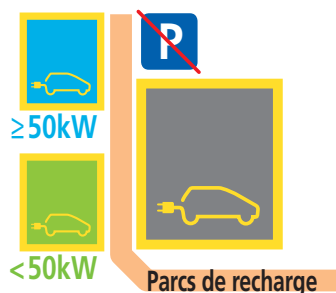


Figure 10.5: Parcs de recharge

10.3.2. Stations de recharge CH (voir également le point 4.3.3.)

Les véhicules électriques sont souvent approvisionnés en électricité par des stations de recharge (Electric Vehicle Supply Equipment EVSE). Ces équipements désignent des dispositifs qui contiennent l'ensemble des composants AC ou DC dans un boîtier et qui sont équipés de prises ou de connecteurs enfichables spéciaux. Les stations de recharge peuvent être accessibles à tous (charge publique) ou soumises à certaines règles (charge privée).

Les stations de recharge actuellement disponibles se classent en trois catégories principales :

1. Wallbox

La station de recharge installée sur un mur n'est généralement équipée que d'un seul type de connecteur enfichable et elle est donc principalement utilisée chez des particuliers.

2. Borne

La station de recharge installée au sol et accessible à tous est généralement pourvue de différents connecteurs enfichables afin de servir le plus grand nombre possible de classes de véhicules électriques.

3. Candélabre

La station de recharge installée sur un lampadaire et destinée à une charge privée ou publique dispose généralement d'un seul type de connecteur enfichable.

Outre la capacité des batteries des véhicules électriques, un réseau de stations de recharge dense est le meilleur moyen de lutter contre l'angoisse de l'autonomie et constitue donc l'un des facteurs clés du succès des BEV. Dé-

sormais, la Suisse dispose d'une infrastructure de recharge très bien développée au regard de celle des autres pays. Toutefois, un grand nombre de consommateurs considèrent l'infrastructure de recharge comme insuffisante et sous-estiment la quantité réelle de stations de recharge disponibles en Suisse. Cette perception entraîne souvent la non-acquisition d'un véhicule électrique. La marge de progression relative aux stations de recharge est assurément encore élevée. Cependant ce domaine est susceptible d'enregistrer une forte accélération de son développement au cours des prochaines années.

Forte de ses quelque 3300 lieux de recharge publics (février 2021) équipés de 9000 points de recharge (février 2021), la Suisse possède l'un des réseaux de recharge de voitures électriques les plus denses d'Europe. Cette avancée est due à l'engagement d'acteurs majoritairement privés qui ont installé des stations de recharge accessibles à tous dans divers endroits, tels que des centres commerciaux, des restaurants et des entreprises. En Suisse, neuf véhicules électriques se partagent un point de recharge public. Ce ratio est comparable à celui de la moyenne européenne qui s'élève à sept véhicules par point de recharge. Toutefois, le réseau de recharge suisse présente une densité nettement supérieure si l'on compare la taille de la Suisse à celle de l'UE.

Un aperçu des stations de recharge publiques pour véhicules électriques, ainsi que des informations relatives à la puissance de charge et aux types de connecteur existants peuvent être consultés sur le site www.ich-tanke-strom.ch (OFEN, swisstopo). Cette page Web indique en temps réel les stations de recharge actuellement disponibles. Les sites e-mobile.ch et lem-net.org proposent un panorama complet des

stations de recharge installées en Suisse et dans toute l'Europe.

Modes de charge

D'une manière générale, il est possible de distinguer quatre modes de charge en fonction du lieu où s'effectue la recharge :

Vert = charge privée

Le point de recharge est installé sur sol privé et n'est accessible qu'au propriétaire du sol ou à des tiers autorisés par le propriétaire.

Bleu = charge publique

Home charging /Work charging

Habituellement, une voiture électrique se recharge à la maison ou sur le lieu de travail. Ce procédé offre un certain confort dans la mesure où la recharge peut s'effectuer pendant la nuit ou pendant les heures de travail sans qu'il soit nécessaire d'y consacrer du temps supplémentaire. Les exigences relatives à la puissance de charge sont également moindres étant donné que le véhicule est raccordé au réseau électrique pour une longue durée. Des stations publiques de recharge lente ou semi-rapide sont souvent proposées sur des places de stationnement réservées à la clientèle, et ce, notamment devant les centres commerciaux, les restaurants et les sièges d'entreprises.

Les voitures électriques sont rechargées aux endroits où elles sont stationnées pendant une période prolongée. À l'heure actuelle, 80 % des recharges sont effectuées sur des stations de recharge privées (home charging et work charging). Une autonomie croissante, des puissances de charge supérieures et une augmentation de la puissance absorbée permettront aux propriétaires des futurs BEV de devoir recharger moins souvent leurs véhicules. Par

Type de station de recharge	Lieu	AC / DC	Puissance	Durée de recharge moyenne	Part des besoins totaux en recharge
Home charging	Domicile ou lieu à proximité immédiate	AC	3,7 à 11 kW	1 à 4 h	60 %
Work charging	Lieu de travail	AC	11 à 22 kW	1 à 4 h	20 %
Point of interest (POI) charging	Station de recharge publique (magasins, structures sportives, hôtels, établissements culturels)	AC/DC	22 à 50 kW	1 à 2 h	12 %
Power / fast charging	Aires de ravitaillement autoroutières	AC/DC	43 à 150 kW (DC) 43 kW (AC)	20 min max.	8 %

Tableau 10.1 : Types de recharge

conséquent, ces modèles deviendront également attractifs aussi pour les conducteurs qui ne disposent pas d'une place de stationnement fixe. Ainsi, il est possible de supposer que la charge publique gagnera en importance à moyen et long terme.

POI charging

L'installation de stations de recharge publiques peut alors se révéler opportune si un accès au public est prévu. L'accès à ces systèmes est notamment autorisé par une clé, une carte ou une application. Les stations de recharge publiques installées, à titre d'exemple, sur des terrains construits de taille plus importante, dans des centres commerciaux ou sur des places publiques nécessitent au minimum l'utilisation de conduits de protection de 80 mm de diamètre.

Alors que de petites quantités d'électricité sont chargées sur des stations de recharge privées pendant une période comprise entre 1 et 4 heures, cette part d'électricité augmente sur des stations de recharge publiques (POI charging) et la durée de recharge est donc réduite (1 à 2 h).

Fast charging

Contrairement aux trois autres types de station de recharge, la priorité est accordée à la recharge (à la manière du ravitaillement d'un vé-

hicule à moteur à combustion à la pompe à essence), et non au stationnement dans le cas des stations de recharge rapide publiques (fast charging). La quantité d'électricité rechargée en moyenne s'obtient à partir d'un compromis entre une durée de recharge moyenne de 15 à 20 minutes et la puissance absorbée individuelle du type de véhicule électrique.

D'après la directive européenne 2014/94/UE sur le déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs, les recharges à une puissance égale ou inférieure à 22 kW sont considérées comme normales alors que celles effectuées à une puissance supérieure à 22 kW sont qualifiées de rapides (power charging ou fast charging).

Sources : Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE, 2019 | Les scénarios de la mobilité électrique en Suisse – mise à jour 2020. Rapport de synthèse EBP, 02.03.2020 | Der Technische Leitfaden. Ladeinfrastruktur Elektromobilität. Version du 3 janvier 2020 | Protoscar, IFEC. Guide d'installation de systèmes de recharge pour véhicules électriques, 2019

11. Batterie

La percée de la mobilité électrique est due à la technologie au lithium appliquée aux batteries. Ces dernières sont disponibles depuis une dizaine d'années et contribuent au bon fonctionnement des véhicules électriques. La batterie est le composant le plus important des BEV à plusieurs égards: le stockage de l'énergie, sa part dans les coûts totaux du véhicule, le poids de celui-ci et la production. Les batteries lithium-ion présentent plusieurs avantages au regard d'autres types de batterie. À titre d'exemple, elles peuvent se décharger davantage et leur densité d'énergie est supérieure à celle des batteries au plomb. Le secteur des véhicules électriques est donc devenu le principal acheteur de batteries lithium-ion.

Source: Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE, 2019 | Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation ISI. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, janvier 2020

11.1. Production

Les batteries des véhicules électriques disposent encore d'une marge de progression considérable en termes d'impact climatique et environnemental. Au cours de leur processus de production, l'objectif consiste notamment à utiliser l'énergie issue de sources renouvelables de manière plus efficace, à accroître la durée de vie des batteries et à augmenter la part de matières premières moins exposées aux risques écologiques et sociaux susceptibles d'être présentés par les pays d'origine.

11.1.1. Mix de matériaux

Capables de peser jusqu'à plusieurs centaines de kilogrammes, les batteries lithium-ion constituent la pièce maîtresse d'une voiture électrique et contiennent des composants précieux, mais aussi critiques en matière d'approvisionnement.

Les matières premières essentielles aux batteries de véhicules électriques sont le cobalt, le lithium, le nickel, le manganèse et le graphite. Dans le domaine de la recherche, les experts sont d'accord sur le fait que les matières premières des batteries sont disponibles en quantité suffisante à l'échelle mondiale. À cet égard, l'extraction des matières premières destinées à la fabrication des batteries influe grandement sur le bilan écologique global de la mobilité électrique.

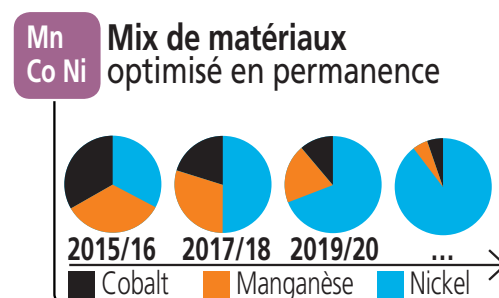


Figure 11.1 : Mix de matériaux

Dans le cas des batteries, le lithium, le nickel et le cobalt sont considérés comme des matières premières critiques en termes d'impact environnemental et d'origine (pays). Une part de 60 % du cobalt exploité à l'échelle mondiale provient notamment de la République démocratique du Congo, un pays secoué par de multiples crises et affecté par l'absence de sécurité au travail et la généralisation du travail des enfants. Les autres gisements de cobalt notables se trouvent en Australie et à Cuba. Le cobalt est principalement exploité comme un sous-produit du nickel et du cuivre. Afin de décrire la situation relative au cobalt, les chercheurs ont conçu des batteries à haute énergie et à teneur riche en nickel et réduite en cobalt (voir graphique de la figure 11.1). S'agissant de ses propriétés chimiques, le nickel ressemble au cobalt et au fer. Il fait partie

des éléments dont la présence est relativement fréquente sur Terre. Ses principaux gisements se trouvent notamment à Cuba, en Nouvelle-Calédonie, au Canada, en Indonésie, en Afrique du Sud et en Norvège. Par ailleurs, les batteries à haute énergie composées de matériaux riches en lithium à haute teneur en manganèse n'en sont encore qu'au stade de développement.

En raison de la demande croissante de BEV, il est nécessaire de renforcer les capacités d'extraction et d'obtention de ces matières premières problématiques. D'un point de vue écologique, il est recommandé d'atteindre cet objectif en faisant appel au recyclage. En effet, il est possible de récupérer plus de 90 % du nickel et du cobalt contenus dans les batteries collectées. Ainsi, le recyclage apporterait une contribution considérable à un approvisionnement sûr en matières premières.

Source: Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation ISI. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, janvier 2020

11.1.2. Réserves de lithium

D'après son étude actuelle de 2020, l'Institut Fraunhofer suppose qu'il sera impossible de réduire considérablement le poids du lithium dans les batteries à haute énergie dans un avenir proche (72 g de lithium par kg de cellule environ).

La majeure partie du lithium mondial disponible se trouve en Amérique du Sud, en Australie, en Chine et aux États-Unis. Le lithium est présent dans les salars (déserts de sel). En Australie, il provient en revanche de l'extraction de minerais. Une part de 25 % des réserves de lithium mondiales sont disponibles dans le désert chilien d'Atacama. Dans les salars, l'eau salée (saumure) contenant du lithium et issue de lacs souterrains est remontée à la surface et s'évapore dans de

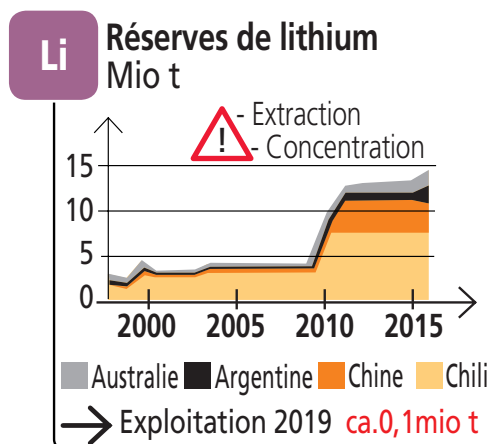


Figure 11.2: Réserves de lithium

grands bassins. La solution saline restante est ensuite traitée au cours de plusieurs étapes jusqu'à ce que le lithium devienne approprié à un usage dans les batteries. Par ailleurs, les très grandes quantités d'eau requises pour la production de lithium (70 000 l/t environ) font l'objet de critiques répétées.

Les quantités de lithium réellement disponibles demeurent un point d'interrogation pour les chercheurs. D'après ces derniers, les réserves de lithium existent toutefois en nombre suffisant à l'heure actuelle. En outre, les experts prédisent avec plus de certitude que l'extraction de lithium ne sera pas en mesure de suivre le rythme d'une demande croissante dans le domaine de la mobilité électrique. Le recyclage industriel du lithium gagnera en importance à l'avenir étant donné que les prévisions supposent que sa récupération issue des batteries usagées permettra de couvrir une part comprise entre 10 % et 30 % des besoins annuels d'ici 2050.

Sources: Kyle Pennell. Gibt es genug Lithium, um den Bedarf für Batterien zu decken? Energy Brainpool, 26.03.2018 | Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation ISI. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, janvier 2020

11.1.3. Valeurs de production

Au regard des véhicules conventionnels, la construction des véhicules électriques consomme une quantité d'énergie nettement supérieure. Selon la source d'énergie, l'efficacité énergétique et la taille des batteries, la pro-

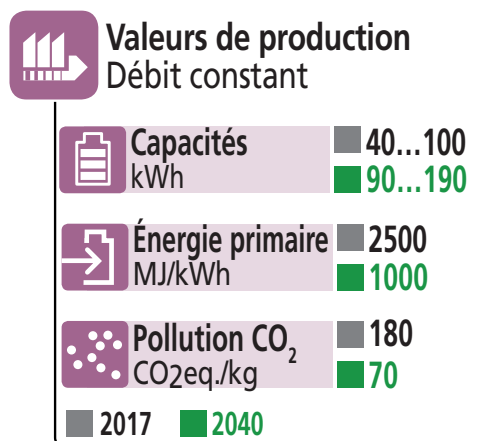


Figure 11.3 : Valeurs de production

duction de celles-ci entraîne une hausse des émissions de gaz à effet de serre comprise entre 70 % et 130 % par rapport à la construction des véhicules à essence ou diesel.

Les chercheurs sont sur la même longueur d'onde : l'énergie requise pour la production des batteries (énergie primaire) influe plus fortement sur le bilan climatique de leur fabrication que les composants des matières premières. Toutefois, la fabrication des batteries lithium-ion est devenue plus économe en énergie et plus respectueuse du climat au cours de ces dernières années. L'écobilan d'une voiture électrique dépend essentiellement de la composition du mix électrique nécessaire à la production des batteries. L'utilisation des énergies renouvelables lors de ce processus et l'accroissement de l'efficacité énergétique permettront d'améliorer le bilan des gaz à effet de serre de la mobilité électrique.

Source : Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation ISI. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, janvier 2020

11.1.4. Densité énergétique / Coûts des batteries

Alors que les coûts des batteries par kilowattheure diminuent, la densité d'énergie moyenne par kilogramme des véhicules électriques augmente (voir graphique de la figure 11.4). Cette évolution entraîne une baisse du poids des batteries et des véhicules électriques, une réduction des coûts d'acquisition de ces derniers,

une hausse de l'autonomie et une amélioration de l'aptitude à un usage quotidien et de l'acceptation de la mobilité électrique.

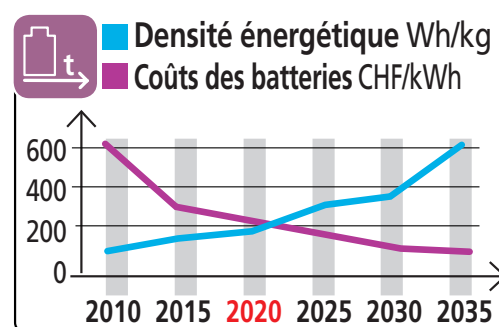


Figure 11.4 : Densité énergétique / Coûts des batteries

La densité d'énergie gravimétrique ou volumique correspond à la quantité d'énergie susceptible d'être stockée en fonction du poids ou du volume du réservoir. La densité d'énergie moyenne des cellules des batteries pour voitures électriques a doublé à 200Wh/kg ou 400Wh/l au cours des dix dernières années. Le secteur de la mobilité électrique fonde de grands espoirs sur de nouvelles compositions de matières qui permettraient d'obtenir une densité d'énergie encore supérieure de 350Wh/kg.

Les coûts d'acquisition supérieurs des BEV au regard de ceux des ICEV s'expliquent par le niveau relativement haut des coûts de la batterie de traction qui représentaient une part comprise entre 30 % et 50 % des coûts totaux des véhicules il y a encore quelques années de cela. Les mesures de réduction des coûts s'appliquent donc en premier lieu au processus de fabrication des batteries.

La baisse des prix des batteries a permis de réduire fortement les coûts d'acquisition des véhi-

cules électriques ces dernières années. Cette tendance devrait se poursuivre de sorte que les coûts de fabrication des batteries seront bientôt susceptibles de passer sous la barre des 100 CHF/kWh.

D'après les analyses de BloombergNEF, le prix des batteries lithium-ion par kilowattheure s'élevait à 102 USD en 2020 et à 137 USD si l'on prend en considération le prix de l'ensemble d'un pack de batteries. Selon les prévisions, les coûts d'acquisition des véhicules à propulsion conventionnelle et électrique se rapprocheront également en parallèle à cette évolution.

11.2. Exploitation

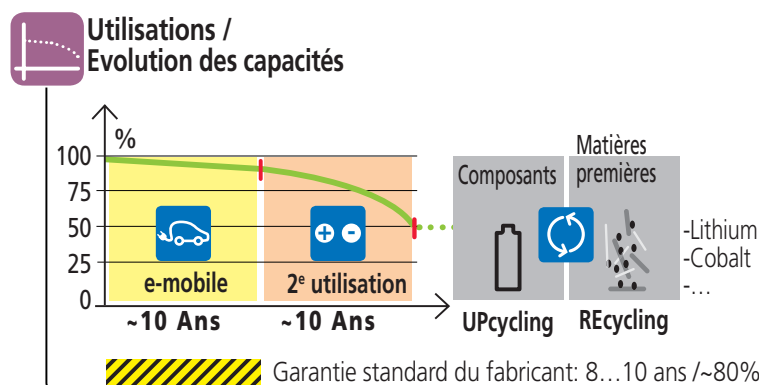
11.2.1. Utilisations / Evolution des capacités

First Life (e-mobile)

Les batteries sont utilisées dans le véhicule électrique jusqu'à ce que leur capacité (et donc l'autonomie de celui-ci) soit réduite à environ 70–80 % de sa valeur initiale. C'est à cet instant, soit en moyenne au bout de dix ans ou d'un nombre de cycles de charge compris entre 1500 et 2500, que la batterie sera, en règle générale, remplacée.

Second Life (2^e utilisation)

Les batteries qui ne sont plus suffisamment performantes pour être utilisées dans le véhicule ne sont en aucun cas dépourvues de valeur étant donné qu'elles présentent toujours une teneur énergétique comprise entre 70 % et 80 % de leur capacité initiale. C'est la raison pour laquelle leur élimination dans cet état n'est pas judicieux, tant d'un point de vue économique que sur un plan écologique. Bien au contraire, les batteries peuvent être réutilisées sous la forme de systèmes de stockage intermédiaire stationnaires dans une seconde vie («second life»). Les batte-



ries usagées des véhicules électriques peuvent servir de système de stockage dans un bâtiment, et ce, notamment si elles sont combinées avec une installation photovoltaïque. L'électricité solaire non utilisée à des fins de consommation propre pendant la journée est ensuite stockée à l'intérieur des batteries lorsque l'installation photovoltaïque ne produit plus de courant. Ce processus permet d'accroître le degré d'auto-utilisation de l'électricité solaire. En outre, les batteries usagées peuvent être également intégrées dans des systèmes de stockage qui fournissent une énergie de réglage à des fins de compensation du réseau. Si une quantité d'électricité trop importante est produite au regard de la demande, il est alors possible de recharger, avec l'excédent d'énergie, les batteries qui couvriront les pics de demande ou serviront de groupe électrogène.

En raison de la charge et de la décharge lentes, cette deuxième utilisation des batteries se déroule de façon plus régulière, ou plus douce, que leur sollicitation dans un véhicule électrique qui ne cesserait de présenter des phases d'accélération et de récupération. À la différence des batteries neuves, ce processus nécessite toutefois de prendre en compte des taux de défaillance supérieurs, ainsi qu'un risque d'incendie plus important. Une deuxième vie des batteries n'est possible que si les batteries usagées satisfont aux exigences en matière de sécurité, de fiabilité et de durée de vie restante.

La deuxième utilisation des batteries de traction n'en est encore qu'au stade de développement et serait susceptible de devenir réalité d'ici 2030 environ si l'on compte avec un retour des batte-

Figure 11.5: Utilisations / Evolution des capacités

ries usagées en quantité suffisante. Le nombre de batteries usagées éventuellement candidates à une deuxième utilisation ne peut être défini avec certitude à l'heure actuelle. Toutefois, les mesures en laboratoire qui ont examiné leur processus de vieillissement, ont donné des résultats prometteurs. Les batteries usagées sont susceptibles d'être utilisées pendant dix années supplémentaires. Dans le cas d'une sollicitation moyenne, une batterie de traction ne devra être éliminée qu'au bout de vingt ans d'après les prévisions actuelles.

UPcycling et REcycling

Si la capacité de la batterie de traction est réellement épuisée après sa première et deuxième utilisation, elle n'en devient pas pour autant un simple «déchets». Les matières premières contenues dans une batterie (le lithium et le cobalt parmi les plus connues) sont bien trop précieuses pour ne pas être réutilisées. Le recyclage des batteries lithium-ion s'est déjà établi en Europe.

Les batteries des véhicules présentent une taille, un poids et une quantité d'énergie stockée qui dépassent nettement ceux des petits appareils. Un recyclage sûr et écologique des batteries de traction constitue une opération réalisable d'un point de vue technique. Toutefois, d'après les résultats obtenus avec les premières installations pilotes ce, de processus nécessite de consentir des efforts importants. Il a cependant déjà permis de récupérer des matières précieuses comme le cobalt, le nickel et le cuivre. Le recyclage du lithium n'est, actuellement pas rentable.

Jusqu'à présent, les batteries usagées des véhicules n'ont encore joué aucun rôle important sur le marché, encore jeune, de la mobilité électrique car il n'existe pratiquement aucune batterie en attente d'être recyclée. Néanmoins, cette situation devrait changer dans les dix à quinze ans à venir.

Sources: Wolfgang Rudschies. Elektroauto-Akkus: So funktioniert das Recycling, ADAC, 13.12.2019 | Institut Fraunhofer pour la recherche sur les systèmes et l'innovation ISI. Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf, janvier 2020

11.2.2. Caractéristiques spéciales Vieillessement des batteries

Les exigences minimales en termes de durée de vie des batteries de traction prévoient un kilométrage compris entre 150 000 et 200 000 km, ce qui équivaut plus ou moins à 1000 cycles de charge complets. La fatigue des batteries est due surtout à la fréquence des cycles de charge/décharge (et notamment à celle des cycles de charge ou de décharge complète) et aux températures ambiantes basses et élevées. Les capacités des batteries et les puissances de charge supérieures, ainsi que leur gestion thermique à bord, permettent de prolonger la durée de vie de ces systèmes de stockage.

Figure 11.6: Caractéristiques spéciales



Caractérist. particulières

- Choix des matériaux / constr. pour longue durée de vie
- Fonctionnement contrôlé (température / puissance)
- Réduction minimale de la capacité (1-2% p.a.)

12. Glossaire

Glossaire

BEV	Battery Electric Vehicle	Véhicule électrique à batterie
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	Véhicule électrique à pile à combustible
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (petrol/diesel/gas)	Véhicule à moteur à combustion interne (essence / gazole / gaz)
PHEV	Plug in Hybrid Electric Vehicle	Véhicule électrique hybride rechargeable
RCP	Regroupement de consommation propre	
HEV	Hybrid Electric Vehicle	Véhicule électrique hybride
POI	Point of interest (destination)	Site touristique
CO₂eq	Équivalent en dioxyde de carbone	
SIA 2060	Infrastructure pour véhicules électriques dans les bâtiments	
SN EN 61851	Système de charge conductive pour véhicules électriques	
PDIE-CH 2018	Prescriptions des distributeurs d'électricité	
MoPEC 2014	Modèle de prescriptions énergétiques des cantons	
NIBT 7.22	Alimentation des véhicules électriques	

Organisations

	auto-suisse
OFROU	Office fédéral des routes
OFEN	Office fédéral de l'énergie
OFS	Office fédéral de la statistique
BFH	Haute école spécialisée bernoise
EPF	Ecole polytechnique fédérale
	Electrosuisse
	Société spécialisée e-mobile.ch
AIE	Agence internationale de l'énergie
ISI	Institut Fraunhofer
NFPA	National Fire Protection Association
PSI	Institut Paul Scherrer
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
TCS	Touring Club Suisse
ATE	Association transports et environnement

13. Spécifications

Charge

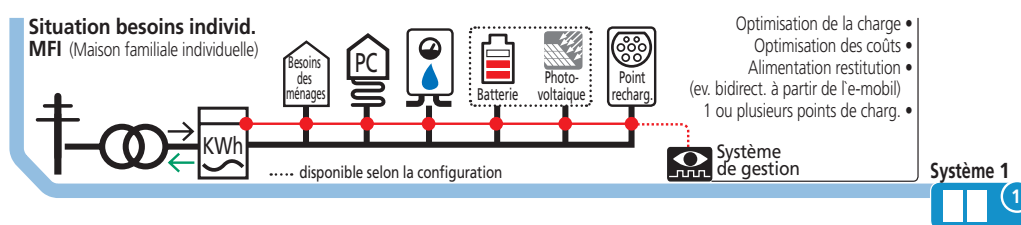


Figure 13.1 : Charge pour besoin individuel (MFI)

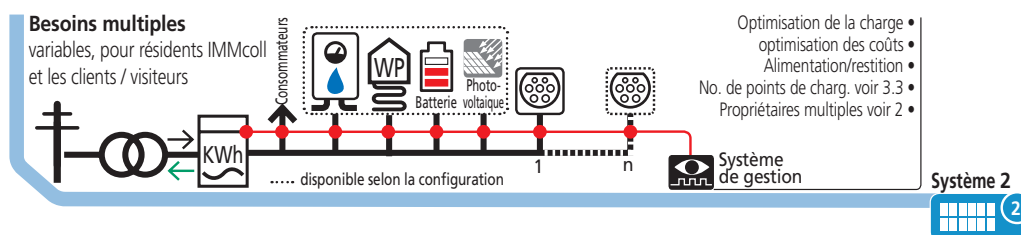


Figure 13.2 : Besoins multiples (immeuble, entreprise, institution publique)

Dans le cas de l'exploitation d'une infrastructure de recharge complexe, il est recommandé de prévoir des mesures appropriées pour le relevé de la consommation, et ce, dès la phase de planification.

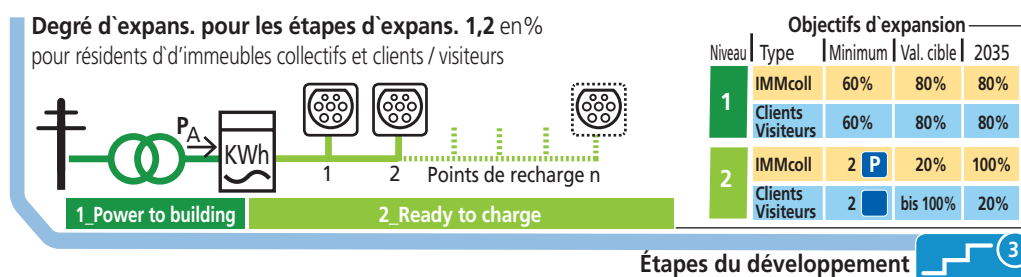


Figure 13.3 : Étapes du développement

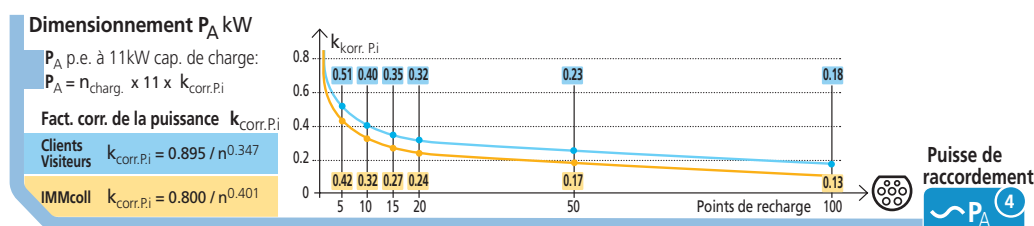
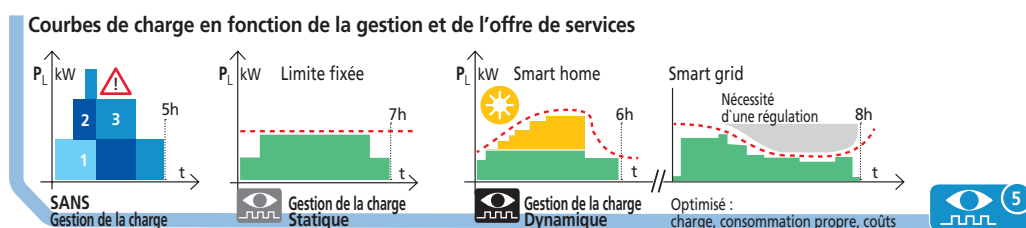


Figure 13.4 : Puissance de raccordement

Figure 13.5: Courbes de charge en fonction de la gestion et de l'offre de services



Valeurs de planification

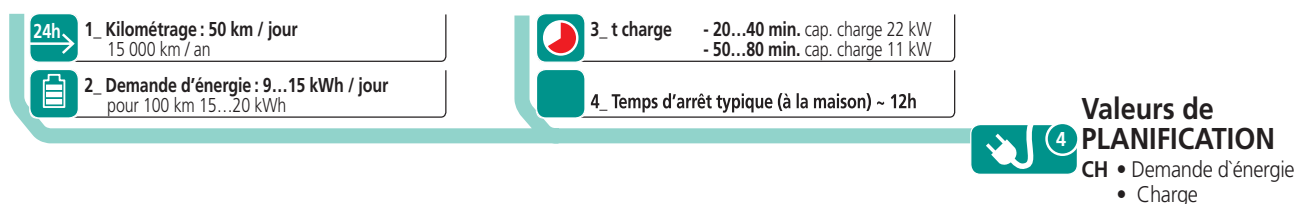
Le nombre de stations de recharge publiques ne cesse d'augmenter. Toutefois, 80 % des véhicules électriques sont rechargés sur des stations de recharge privées (au domicile) ou installées sur le lieu de travail. Cette situation ne va pas évoluer dans un avenir proche car cette variante est la plus économique. La mise en place de l'infrastructure de recharge privée constitue actuellement le «défi majeur de la mobilité électrique», et ce, en raison précisément du fait que les locataires ou les copropriétaires représentent 75 % de la population résidente en Suisse.

Les propriétaires, exploitants ou loueurs d'un bien immobilier se posent les questions fondamentales suivantes: Quelle infrastructure devra être proposée? Quels seront les investissements nécessaires? Pour qui cette infrastructure sera-t-elle installée? Comment l'installation sera-t-elle utilisée? Faudra-t-il une infrastructure de recharge rapide? À combien s'élèveront les coûts d'exploitation et de maintenance? Comment s'effectueront le comptage et la facturation?

Si la mobilité électrique connaît une période de croissance, la demande de possibilités de recharge va, elle aussi, dans ce sens. L'avenir de l'industrie automobile branchée sur batterie présente donc un potentiel de croissance important pour la branche des installateurs et remplit ses carnets de commandes dans les domaines de la planification, de la pose et de l'entretien de l'infrastructure de recharge. Plus il sera possible d'anticiper la planification électrique, plus ces prévisions permettront de réaliser une infrastructure de recharge moins coûteuse pour les véhicules à batterie. Dans le cas de bâtiments neufs, il est recommandé de définir le futur standard d'équipement de l'infrastructure de recharge dès le début de la phase de réalisation, et de procéder par anticipation en adoptant différentes mesures comme la pose de conduits, de chemins de câbles et de fondations. En outre, il est également opportun d'envisager une gestion de la charge pour l'avenir.

La câble menant aux bornes d'alimentation des véhicules électriques doit être le plus court possible et dimensionné de telle sorte qu'aucune chute de tension importante ne se produise sur

Figure 13.6: Valeurs de planification



le câble en cas de charge maximale. Pour les câbles dont la longueur dépasse 50 m, il est recommandé d'augmenter leur section. Il est reconnu que le facteur de simultanéité d'un branchement peut être fixé à 1 pour un véhicule électrique individuel.

Station de recharge privée ou publique

Selon le lieu d'installation et le type d'utilisation, il est nécessaire de répondre à la question de savoir si la station de recharge doit être accessible à tous ou seulement à un cercle fermé d'utilisateurs. Dans le cas de l'exploitation d'une infrastructure complexe, il est recommandé de prévoir dès la phase de planification des mesures appropriées à la surveillance, à l'évaluation et à la facturation des recharges.

Nombre de points de recharge

Une planification et une installation prévoyantes de points de recharge en quantité suffisante permet d'empêcher que les propriétaires de véhicules alimentent le leur en électricité en branchant notamment des cordons prolongateurs, des enrouleurs de câbles, des prises multiples ou des adaptateurs de voyage sur des prises disponibles dans des pièces d'habitation, des caves ou des couloirs. En effet, une telle situation serait susceptible de causer des dangers évitables.

Besoins en puissance de raccordement

Les chargeurs de véhicules électriques sont susceptibles de produire des effets néfastes sur la qualité du réseau, de générer des asymétries indésirables et de provoquer des courants plus importants dans le conducteur neutre (harmoniques). Raison pour laquelle une demande de raccordement au gestionnaire du réseau de distribution est indispensable dès les petites puissances, afin de pouvoir engager des mesures suffisamment tôt et de garantir ainsi la

qualité du réseau. À cet égard, le risque d'une mauvaise qualité de réseau causée par des récepteurs asymétriques concerne surtout des réseaux à impédances élevées (grandes distances par rapport au transformateur de distribution, câbles à petite section, etc.). Il est possible que le réseau de distribution doive être étendu si des puissances de charge supérieures sont requises.

Les raccordements d'immeuble et les câbles d'alimentation du réseau du distributeur sont la plupart du temps calculés et configurés avec un facteur de simultanéité compris entre 0,2 et 0,3, soit entre 20 % et 30 % de la puissance connectée. La puissance connectée totale d'une maison dépasse donc nettement celle fournie par le réseau. Il est donc absolument nécessaire d'intégrer un système de gestion de la charge à des installations de grande taille. En outre, il convient également de surveiller le courant sur le raccordement d'immeuble et de bien régler l'infrastructure de recharge. Dans certains cas, il peut aussi être indispensable d'augmenter la puissance de raccordement du bâtiment.

Le dimensionnement correct de la puissance de raccordement présente actuellement des valeurs typiques lors de la recharge de véhicules électriques qui influent de façon déterminante sur la sécurité et la fiabilité de ce processus. Il est par conséquent important de bien prendre en compte, au stade de la planification, les éléments suivants: le type et le nombre de véhicules prévus pour le site concerné, la puissance de charge des véhicules à raccorder, la durée de stationnement moyenne estimée et le comportement de charge des propriétaires des véhicules.

Par ailleurs, un système de gestion de la charge permet de réduire les besoins en puissance de

raccordement. La variabilité de ces facteurs influents est très élevée et complique la définition de valeurs indicatives pour le nombre de points de recharge et la puissance à installer.

Les indications relatives à la puissance de charge à installer sont susceptibles de fournir les kilométrages journaliers moyens à prévoir. Il est nécessaire de fixer pour chaque station de recharge le nombre de points de recharge disponibles, ainsi que leur possibilité d'exploitation simultanée à pleine puissance.

Le facteur de simultanéité indique le nombre de récepteurs électriques fonctionnant simultanément à pleine puissance dans une maison ou sur un circuit. Il se calcule en additionnant les puissances de l'ensemble des récepteurs concernés. Ce résultat permet ensuite de déterminer la puissance de raccordement totale qu'il convient de prévoir. Le chapitre Charge/Puissance de raccordement fournit sur ce point des informations précieuses et représente les valeurs indiquées dans le cahier technique SIA 2060. Ces dernières reposent sur l'utilisation d'un système de gestion de la charge.

Obligation d'annoncer

D'après l'art. 23 de l'OIBT et les prescriptions des distributeurs (CTR 2018), une demande de raccordement et un avis d'installation sont requis à partir d'une puissance de raccordement de 3,6 kVA (puissance apparente) pour l'ensemble des appareils et des installations. Selon

les prescriptions des distributeurs (CTR 2018), un avis d'installation doit toujours être transmis, et ce, quelle que soit la puissance de la station de recharge.

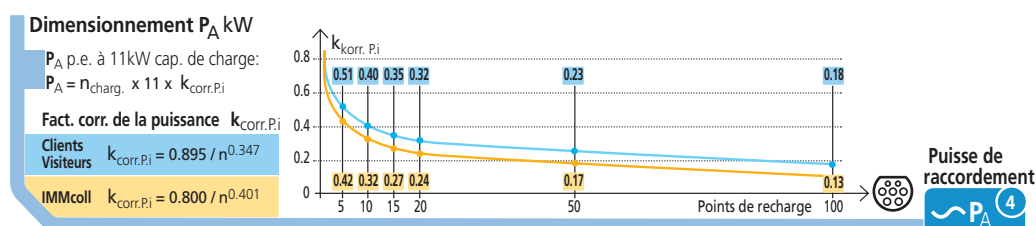
L'installation d'une infrastructure de recharge pour véhicules électriques est soumise à l'obligation d'annoncer au gestionnaire du réseau de distribution (GRD). Un coupe-surintensité (fusible, disjoncteur de canalisation) et un disjoncteur de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) sont prescrits pour chaque véhicule électrique. Les documents suivants doivent être remis au gestionnaire du réseau de distribution: la demande de raccordement, l'avis d'installation et, une fois les travaux achevés, le rapport de sécurité.

Lieu d'installation

Le lieu doit être sélectionné de manière à toujours permettre de procéder à l'ensemble des manipulations liées au processus de charge en toute sécurité. Le véhicule doit pouvoir être raccordé sans utiliser de cordons prolongateurs ni d'enrouleurs de câbles. Par conséquent, la station de recharge doit être installée à proximité immédiate des emplacements à approvisionner, sans toutefois présenter un danger pour les personnes ou pour les véhicules.

Le modèle et les dimensions de la station de recharge doivent être choisis en fonction de son environnement. Par ailleurs, il convient de veiller à un éclairage suffisant sur le lieu d'exploitation.

Figure 13.7 : Puissance de raccordement



Selon le lieu d'installation et le type d'utilisation, la station de charge doit satisfaire aux exigences relatives à des facteurs d'influence environnementaux, à savoir: la résistance mécanique (butoirs de protection, vandalisme, graffiti), la résistance aux intempéries (degré de protection approprié, plage de températures de service), la résistance au rayonnement UV, la résistance à la corrosion et les vibrations.

Installation électrique

Les limites de charge physiques d'une prise sont parfois atteintes lors de la recharge des véhicules électriques. Il s'agit ici notamment des prises domestiques, car celles-ci ne conviennent pas au prélèvement continu du courant nominal. Étant donné que la recharge d'un véhicule peut durer de six à huit heures, il est nécessaire de tenir compte de ce facteur au moment de choisir les prises et de monter l'installation.

Malgré un principe de base identique, des différences importantes apparaissent entre les récepteurs électriques classiques en usage au domicile et l'alimentation d'un véhicule en énergie électrique. Elles permettent de savoir très rapidement pourquoi il est nécessaire de procéder à une planification approfondie, ainsi qu'à un dimensionnement généreux. Alors que le fonctionnement d'un lave-linge, par exemple, ne doit faire l'objet d'aucune précaution particulière, la recharge d'un véhicule électrique est soumise, quant à elle, au respect des exigences relatives à ce processus. Le lave-linge présente certes, lui aussi, une consommation importante, mais il sollicite ce potentiel sur une durée relativement courte, pour chauffer l'eau de lavage. Dans le cas du véhicule électrique, une puissance électrique très élevée est appelée pendant la durée de la recharge, un processus qui peut prendre plusieurs heures. L'infrastructure

de recharge doit donc être dimensionnée correctement. Une recharge sûre et non surveillée pendant plusieurs heures doit être garantie non seulement dans le domaine privé, mais aussi dans les zones publiques.

Les chargeurs des véhicules électriques sont des appareils à changement de fréquence (prescriptions des distributeurs PDIE, point 8.31) capables de consommer une puissance supérieure à celle d'un appareil électroménager moyen. Raison pour laquelle il est impératif de déposer des demandes de raccordement pour des puissances supérieures ou égales à 2 kVA $\approx$ 2 kW. Seuls les branchements triphasés sont autorisés pour les puissances supérieures à 3,6 kVA $\approx$ 3,7 kW (prescriptions des distributeurs PDIE, point 8.13).

Il convient d'utiliser des câbles et des prises résistants aux contraintes mécaniques et thermiques (prise CEE ou «Home Charge Devices» au lieu des prises traditionnelles).

Montage des prises

Les prises doivent être montées le plus près possible du véhicule à recharger. Les passages ou les zones praticables entre le branchement et le véhicule électrique doivent être évités. La hauteur de montage idéale est comprise entre 1 et 1,5 m au-dessus du sol. La longueur classique des câbles de raccordement fournis par les fabricants de véhicules est, elle, comprise entre 5 et 7 m environ. Chaque prise («connecting point») doit être équipée d'un dispositif de protection individuel (disjoncteur de canalisation) et d'un disjoncteur de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) ou d'une combinaison des deux. Afin de pouvoir réenclencher tout seul un disjoncteur combiné déclenché, il est judicieux de poser ce dernier le plus près possible de la prise. Seules des forces de trac-

Optimisation locale

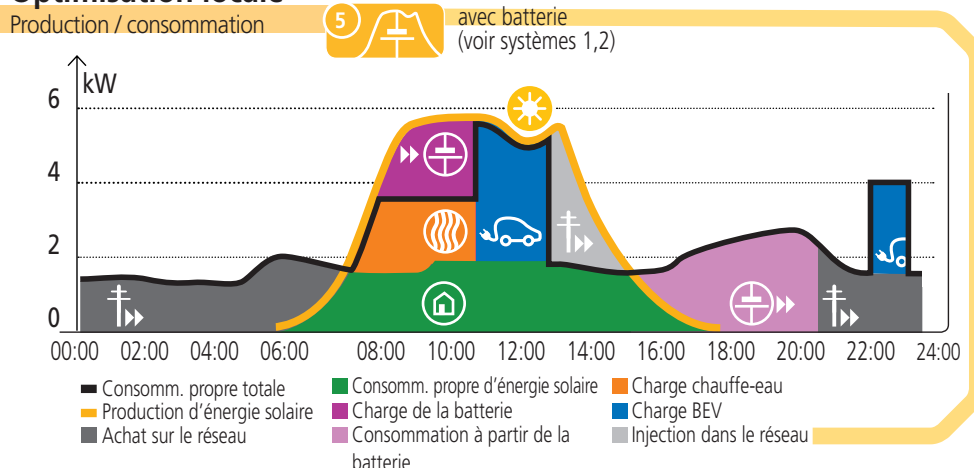


Figure 13.8: Optimisation locale

tion et de torsion minimales doivent être exercées sur les connecteurs (usure du matériau et problèmes de contact). Il convient d'utiliser un matériel qui offre au minimum un degré de protection IP44.

Raccordement au réseau

La recharge simultanée de plusieurs véhicules électriques peut suffire à épuiser le potentiel du raccordement d'immeuble. Il est donc nécessaire de vérifier dès le branchement d'une station de recharge la nouvelle puissance simultanément requise par le raccordement d'immeuble dès le branchement d'une station de recharge. Malgré l'utilisation d'un système de gestion de la charge, il peut être également indispensable de renforcer ou d'étendre le raccordement d'immeuble afin de pouvoir alimenter les véhicules électriques. Un dimensionnement d'emblée effectué de manière généreuse pour les câbles d'alimentation, les tableaux de distribution et d'autres composants correspondants, permettra d'éviter d'éventuels coûts importants susceptibles de survenir lors d'un (ré)équipement ultérieur.

Courant de charge et symétrie du réseau

Dans des bâtiments ou des immeubles de taille plus importante disposant de plusieurs branchements pour véhicules électriques, il est impératif de bien vérifier la charge symétrique du réseau (application conséquente de l'inversion des phases). Il convient de coordonner les éventuelles mesures avec l'EAE.

Les consommateurs d'énergie doivent être branchés de telle sorte que la charge soit distribuée sur tous les conducteurs polaires de la façon la plus symétrique possible (voir prescriptions des distributeurs PDIE, point 8.12).

Nouvelle installation et rééquipement

À la différence des nouvelles installations, les installations électriques déjà existantes n'ont, en règle générale, pas été dimensionnées pour la recharge de véhicules électriques. Raison pour laquelle une recharge sur des installations non contrôlées peut s'avérer dangereuse. Ce point ne s'applique pas uniquement à une recharge à partir d'un dispositif de charge, mais aussi à l'installation située en amont. Ainsi, il convient d'éviter les surcharges et donc le risque d'incendie ou de dysfonctionnement des dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel existants.

Il est recommandé d'installer des stations de recharge des modes de charge 3 ou 4. Elles offrent à la fois confort et sécurité de fonctionnement et d'investissement.

L'infrastructure de recharge pour la mobilité électrique fait partie intégrante des installations énergétiques et électriques. Les installations énergétiques doivent être construites et exploitées de manière à garantir la sécurité technique. Le montage d'une station de recharge fixe sur le réseau pour les modes de charge 3 et 4 ou l'intégration d'une prise de terre ou d'une prise

industrielle pour les modes de charge 1 et 2 dans une infrastructure existante constitue une extension de l'installation électrique. Dans le cas d'une nouvelle installation et d'une extension, il est nécessaire de prendre en considération les parties applicables de la NIBT et notamment la section 7.22. La disponibilité de la puissance de raccordement doit par ailleurs être clarifiée avec l'exploitant du réseau.

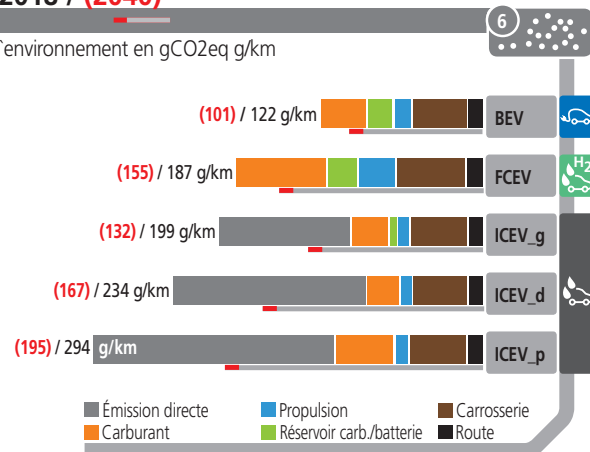
Sources: *Der Technische Leitfaden. Ladeinfrastruktur Elektromobilität. Version du 3 janvier 2020 | Electrosuisse, e'mobile et AES (éd.). Créer le contact. Mobilité électrique et infrastructure, 2015*

Émissions 2018 / 2040

D'après les bilans écologiques actuels et les valeurs relatives aux émissions de CO₂, les voitures électriques sont nettement supérieures aux moteurs à combustion conventionnels, compte tenu de la construction des véhicules (batteries incluses) et de l'utilisation du mix électrique suisse.

Émissions 2018 / (2040)

La pollution de l'environnement en gCO₂eq g/km



Développement typique



Ventes BEV

- Développement Norvège 2013...2019
- Etat ACTUEL Suisse 2019 / Prévision 2025

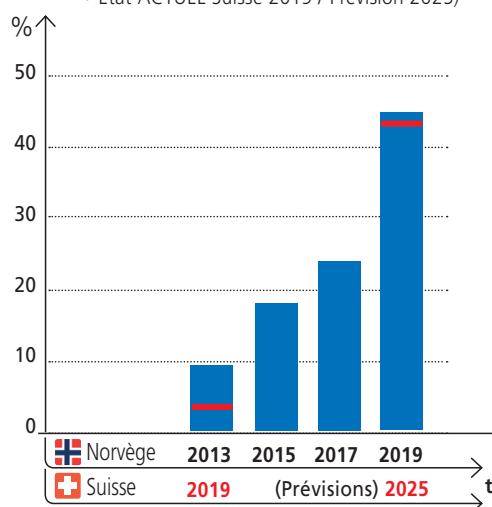


Figure 13.10: Comparaison des ventes de BEV en Norvège et en Suisse

Figure 13.9: Comparaison des écobilans 2018/2040

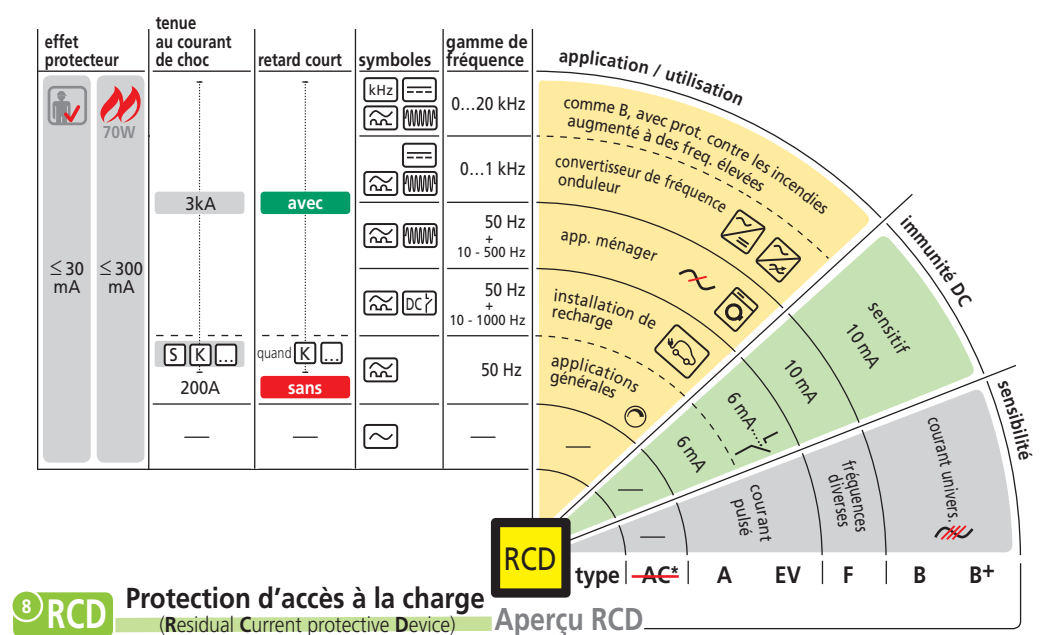


Figure 13.11 : Protection d'accès à la charge

Protection par RCD

Dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) La NIBT 2020 exige pour tous les circuits terminaux ≤ 32A un temps de coupure de 0,4 s (4.1.3.2). Un dispositif RCD de 30mA maximum doit également être installé pour chaque point de raccordement d'un véhicule électrique (NIBT 2020, 7.22.5.3.1).

Si la station de recharge pour véhicules électriques est équipée d'une prise ou d'un connecteur, il convient de prévoir des mesures de protection contre les courants de défaut continus à moins que celles-ci soient intégrées à la station. Les dispositifs adaptés à tout point de raccordement sont les suivants :

- Dispositif de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) type B ou
- Dispositif de protection à courant différentiel-résiduel (RCD) type EV

Notes

[illegible]



www.electrosuisse.ch