Numéro 2
MAI-JUIN 2022

REE

REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE

ÉNERGIE | TÉLÉCOMMUNICATIONS | AUTOMATIQUE | INFORMATIQUE

TIRÉ À PART DE LA REVUE REE 2022-2

CAHIER AZUR

Solutions innovantes pour la mobilité électrique

MOTORISATIONS ÉLECTRIQUES POUR L'AUTOMOBILE P. 7

INTÉGRATION ET MODULARITÉ DES CHAÎNES DE CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUES P. 15

MISE EN ŒUVRE INDUSTRIELLE DU CONCEPT VEHICLE-TO-GRID (V2G) P. 20

TIRÉ À PART DE LA REVUE REE 2022-2

Liminaire

La commémoration « Ampere 200ans » a suscité plusieurs événements et communications auxquels nous avons associé des publications, des enregistrements ou la diffusion des présentations.

Les conférences ou les brochures sont disponibles et consultables sur le site Ampère200ans.fr.

La revue REE a relayé en particulier les journées thématiques sous la forme de «cahier Azur», recueil d'articles sur les sujets présentés.

Nous avons pensé à vous adresser ce tiré à part du cahier Azur relatant l'événement en souvenir de cette journée, à laquelle vous avez participé ou contribué, mais surtout pour permettre à un plus large public, au-delà des lecteurs habituels de la REE, de profiter de la richesse et de la qualité des informations présentées dans cette revue dont nous remercions les auteurs.

Très bonne lecture,

François Gerin

SOMMAIRE

3 CAHIER AZUR : CONFÉRENCE CENTRALESUPÉLEC OCTOBRE 2021 «Solutions innovantes pour la mobilité électrique»

3 Introduction
Marc Petit, Jean-Claude Vannier

7 Motorisations électriques pour l'automobile
Xavier Jannot, Cédric Plasse

15 Intégration et modularité des chaînes de conversion électromécaniques
Antoine Cizeron, Javier Ojeda, Olivier Béthoux

20 Mise en œuvre industrielle du concept *vehicle-to-grid* (V2G) : participation au réglage de la fréquence du système électrique
Paul Codani, Marc Petit

© Have a nice day Photo / Shutterstock

Des solutions innovantes pour la mobilité électrique

Introduction

Jean-Claude Vannier
Chef de département, CentraleSupélec
Marc Petit
Professeur des Universités
CentraleSupélec

En octobre 2021, dans le cadre des commémorations « Ampère 200ans », la SEE a organisé avec CentraleSupélec une journée sur la mobilité électrique [1]. Trois des présentations font l'objet d'un article pour ce cahier Azur. Les deux premières concernent les systèmes de motorisation pour véhicules électrifiés, et la troisième présente la façon dont le concept « *vehicle-to-grid* » se prépare à entrer dans une phase d'industrialisation avec des services associés.

Le développement de la mobilité électrique est un enjeu fondamental pour atteindre les objectifs de décarbonation de la société. Cette mobilité électrique peut se voir à plusieurs niveaux : le secteur automobile pour une mobilité individuelle, et les transports en commun (bus, transport ferroviaire). Après des années de progression lente du secteur automobile, le mouvement s'accélère avec des parts de marchés en hausse, grâce à une offre plus complète des constructeurs automobiles (véhicules ●●●

1 https://ampere200ans.fr/retour-sur-la-journee-mobilite-electrique-du-19-octobre/

" Plusieurs projets d'avion électrique pour les déplacements régionaux sont en cours de réalisation dans le monde. Des offres existent déjà pour des petits avions munis d'une propulsion en tout électrique. "

hybrides, hybrides rechargeables, et électriques) et une évolution de la société. Les bus aussi s'électrifient avec des offres hybrides ou tout électriques. Quant au transport ferroviaire, il est fortement électrifié, mais dans beaucoup de pays (dont la France), il reste des lignes non électrifiées qui utilisent des locomotives diesel. Pour ces lignes, de nouvelles solutions à base de batteries ou d'hydrogène sont proposées par certains grands constructeurs du secteur.

Dans le domaine maritime, les applications sous-marines de la propulsion électrique sont un exemple connu depuis longtemps. Les navires de surface ne sont pas en reste et peuvent maintenant utiliser des moteurs électriques pour entraîner les hélices en formant une structure intégrée, les *pods*, placés à l'extérieur de la coque et qui augmentent nettement la maniabilité du bateau.

Le domaine aéronautique, bien qu'il ne représente qu'une faible part de la consommation d'énergie, est aussi amené à évoluer pour respecter les objectifs de développement durable. Plusieurs projets d'avion électrique pour les déplacements régionaux sont en cours de réalisation dans le monde. Des offres existent déjà pour des petits avions munis d'une propulsion en tout électrique. Toutefois, la masse des batteries ne leur permet pas encore d'avoir des performances en autonomie, vitesse ou masse utile, tout à fait comparables à celles des avions à moteur thermique mais ils sont parfaitement adaptés pour des applications comme les écoles de pilotage.

Pour tous ces secteurs, une brique commune existe même si les niveaux de puissance ne sont pas les mêmes : la chaîne de traction électrique construite autour du moteur électrique. Pour les systèmes à batterie, c'est la problématique de la recharge qui se pose : à la fois sa gestion (puissance et énergie) la plus « intelligente » possible, c'est-à-dire la plus flexible possible, et de nouveaux concepts tels que l'utilisation des batteries pour le soutien (*vehicle-to-grid*) à un système électrique en profonde mutation.

Les systèmes de motorisation : à la recherche de nouvelles innovations

Depuis le début de l'ère de l'électrification des moyens de transport, que ce soit dans l'automobile ou l'aéronautique (pour certaines fonctions), les efforts de R&D visent à développer et optimiser des machines électriques ou des actionneurs qui répondent à une contrainte de performances (niveaux de couple, vitesse, puissance) tout en minimisant la masse et le volume ; ces deux paramètres impactant la consommation du véhicule. Toutefois, l'optimisation ne saurait être que technique, il faut aussi minimiser les coûts et prendre en compte l'accessibilité de certaines ressources telles que les terres rares pour la fabrication d'aimants. En matière de coûts, le choix de la solution peut être différent selon qu'il s'agisse de produire en petite série ou très grande série. Or, de ce côté, les choses sont amenées à bouger avec la fin annoncée des véhicules thermiques et par conséquent le fort déploiement des véhicules électriques.

L'article de **Xavier Jannot** et **Cédric Plasse** repositionne l'électrification du secteur automobile comme une solution clé pour atteindre les objectifs de décarbonation à horizon 2050. Puis, dans un second temps, les architectures de base d'une traction électrifiée sont rappelées avec quatre composantes importantes pour ce qui concerne la voie électrique : *la batterie* (réservoir d'énergie), *le convertisseur électronique de puissance couplé à la machine électrique* (pour la conversion DC vers AC, et pour le pilotage de la machine), et *la partie mécanique pour le couplage à l'essieu et aux roues*. Enfin, dans un troisième temps, les exigences de performances et d'efficience

"Les véhicules électriques proposés initialement par les constructeurs avaient une autonomie assez limitée (guère plus de 150 km) avec une batterie ne dépassant pas 25 kWh. Mais progressivement des progrès scientifiques et technologiques ont été réalisés pour augmenter les densités massique et volumique d'énergie, ce qui permet aujourd'hui de disposer de des batteries de 50 à 100 kWh selon les modèles."

sont spécifiées pour des véhicules tout électrique. Par exemple, en termes de performances, on indique les domaines couple-vitesse et puissance-vitesse à atteindre pour trois types de régimes : transitoire 10 secondes, transitoire 30 secondes et régime permanent. Et en termes d'efficience, l'analyse de consommation sur un cycle de roulage normalisé est un critère de référence. L'article se termine par une comparaison des trois types de machines électriques qu'il est possible de trouver dans les véhicules électriques : moteur asynchrone (Audi e-tron), moteur synchrone à excitation électrique (Renault Zoe, BMW i4), et moteur synchrone à aimants permanents (Peugeot e208, BMW i3).

Après cette entrée en matière, l'article d'**Antoine Cizeron**, **Javier Ojeda** et **Olivier Béthoux** propose une analyse de l'intégration et modularité des chaînes de conversion électromécaniques. Il s'agit de briser l'approche classique avec les trois briques constituées de la batterie, du convertisseur électronique et du moteur électrique. Les auteurs proposent une approche modulaire où une brique de base de 10 kW serait dupliquée pour constituer la chaîne complète. La machine électrique serait constituée de plusieurs bobinages triphasés, chacun étant alimenté par son propre module {batterie + onduleur}. Ce type d'approche modulaire et multiniveaux a été proposé dans le domaine des convertisseurs de puissance pour les liaisons électriques HVDC (haute tension courant continu) pour le transport à très haute puissance. Cette nouvelle structure de chaîne de conversion constitue la thèse de doctorat d'Antoine Cizeron, et a donné lieu à un dépôt de brevet international.

Les batteries des véhicules : des systèmes de stockage à exploiter

Les véhicules électriques proposés initialement par les constructeurs avaient une autonomie assez limitée (guère plus de 150 km) avec une batterie ne dépassant pas 25 kWh. Mais progressivement des progrès scientifiques et technologiques ont été réalisés pour augmenter les densités massique et volumique d'énergie, ce qui permet aujourd'hui de disposer de batteries de 50 à 100 kWh selon les modèles.

Avec le développement de la mobilité électrique, nous allons assister à l'arrivée massive de capacités de stockage connectées temporairement au réseau électrique. La problématique du stockage (et plus largement des flexibilités) est amenée à devenir un point critique de l'optimisation technico-économique des systèmes électriques. Ces batteries de véhicules peuvent être une opportunité pour les deux parties : les acteurs du système électrique et les utilisateurs de véhicules électriques. Pour les premiers ce sont des capacités additionnelles de stockage, et pour les seconds un moyen de valoriser un élément très coûteux du véhicule (surtout si on considère qu'un véhicule passe une grande partie de son temps stationné).

L'article co-signé par **Paul. Codani** et **Marc Petit**, propose d'illustrer une des utilisations envisagées pour valoriser ces batteries de véhicules, à savoir une participation au réglage primaire de la fréquence. Cet article rappelle les caractéristiques du service visé, et un petit historique des travaux de recherche qui conduisent aujourd'hui à la préparation d'une mise en œuvre industrielle par DREEV. L'article présente les différentes étapes qu'il a fallu franchir pour passer du concept de recherche à une solution industrialisable certifiée par RTE. ■

Les articles

Motorisations électriques pour l'automobile ; Enjeux et solutions technologiques p.7
Intégration et modularité des chaînes de conversion électromécaniques p.15
Mise en œuvre industrielle du concept vehicle-to-grid (V2G) pour une participation au réglage de la fréquence du système électrique p.20

Pour avoir accès à toutes les revues SEE

L'adhésion donne accès à l'ensemble des revues numériques de la SEE.
Il n'est donc pas utile de souscrire d'accès numériques supplémentaire aux revues.

REE REVUE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE

La Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE) est une revue au service des ingénieurs, chercheurs, enseignants, décideurs techniques et économiques intéressés par les secteurs de l'électricité, de l'électronique, de l'information et de la communication.

Connaître l'état de l'art des sciences et technologies dans ces domaines ainsi que leurs évolutions dans les différents domaines d'application permet au lecteur d'enrichir ses compétences et de rester en ligne avec l'actualité.

Paraissant cinq fois par an, la REE offre un large panorama de ces technologies présenté par les personnalités du monde de la recherche et de l'industrie les plus au fait des derniers développements.

Cette information est complétée par des rubriques d'actualité, des points de vue, des libres propos ou des entretiens sur les grands enjeux technologiques du moment et sur les faits marquants du domaine couvert par la revue.

On y trouve également régulièrement le programme des activités de la SEE, dont la REE est le principal organe d'expression.

L'année 2022 avec la REE ...

Abonnez-vous à la REE

La REE est une publication trimestrielle de la SEE

Choisissez votre formule d'abonnement pour 2023 :

Version papier
5 numéros : mars, mai, juillet, octobre, décembre.
Distribution postale

Version numérique
Accès aux publications numériques
ouvert pendant un an à compter de la date du paiement

Version duo
Version imprimée
+ version numérique

Accédez à la page d'abonnement

La Revue 3E.I

La revue 3EI suspend sa publication en 2023 pour réfléchir à l'amélioration de son contenu, afin d'être plus en phase avec les attentes de ses lecteurs. La reprise de la revue est prévue en 2024.

L'année 2022 avec La Revue 3E.I ...

Motorisations électriques pour l'automobile

Enjeux et solutions technologiques

Xavier Jannot,
Cédric Plasse
Nidec PSA emotors

Les objectifs ambitieux de réduction des émissions du secteur des transport conduisent à une électrification massive des véhicules, que ce soit pour des solutions tout électrique ou hybride. Le groupe moto-propulseur électrique devient un organe fondamental à optimiser. Les efforts de R&D dans le domaine des machines électriques et de leur association aux convertisseurs électroniques sont à poursuivre !

Introduction

Face aux évolutions climatiques constatées [1] et à la prise de conscience de la société civile, des orientations politiques ont été prises pour limiter l'impact de l'activité humaine sur le réchauffement climatique, notamment concernant l'émission des Gaz à Effet de Serre (GES) . Le scénario privilégié consiste à limiter l'élévation de température à 1,5 °C par rapport au niveau préindustriel. Au regard de cet objectif, les Etats signataires de l'Accord de Paris mettent en œuvre des plans visant à atteindre un équilibre strict entre les émissions de GES et leur capacité d'absorption de GES à l'horizon de l'année 2050. La France a établi depuis 2015 la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) décrivant sa feuille de route [2] ; elle est illustrée sur la figure 1 ci-contre, exprimée en équivalent CO_2 (contributeur majoritaire des GES).

Le secteur des transports constitue une part importante des GES émis, représentant 31% du total en France en 2019. Cette prépondérance conduit à une attention particulière au sein de la SNBC, dans laquelle est définie une trajectoire pour ce secteur décrite sur la figure 2.

La décarbonation du secteur des transports, des voitures en particulier, constitue donc un enjeu majeur des décennies à venir. La figure 3 présente une analyse comparative des émissions de CO_2 sur le cycle de vie du puits à la roue des véhicules thermiques et électriques, en fonction des pays et de leur mix énergétique dans la production d'électricité.

Cette analyse montre une réduction moyenne de 63 % des émissions de CO_2 à l'échelle européenne en passant d'un véhicule thermique à un véhicule électrique à horizon 2030. La transition rapide vers ce type de véhicule est donc un enjeu primordial qui s'accompagne de nombreux défis sociétaux, économiques, scientifiques, technologiques et d'infrastructures [4]. C'est dans cette pers- ●●●

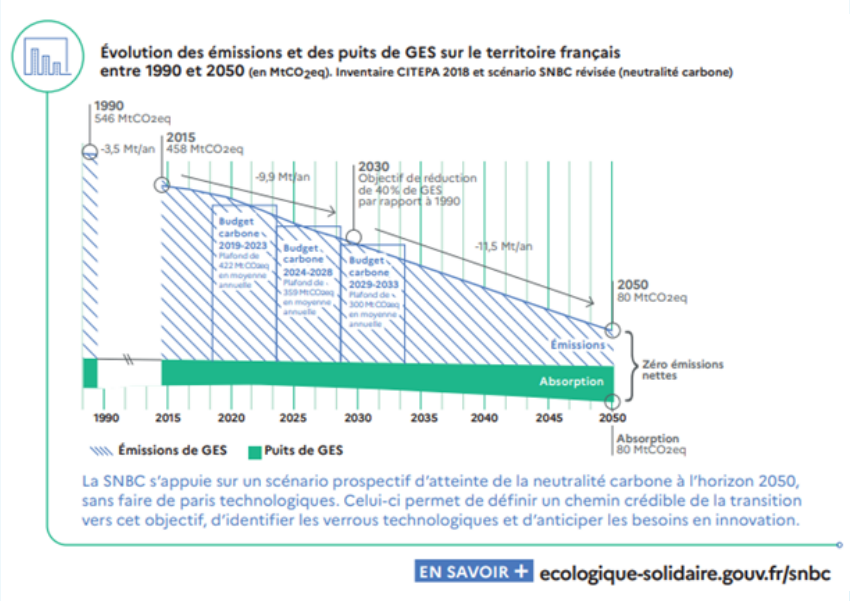
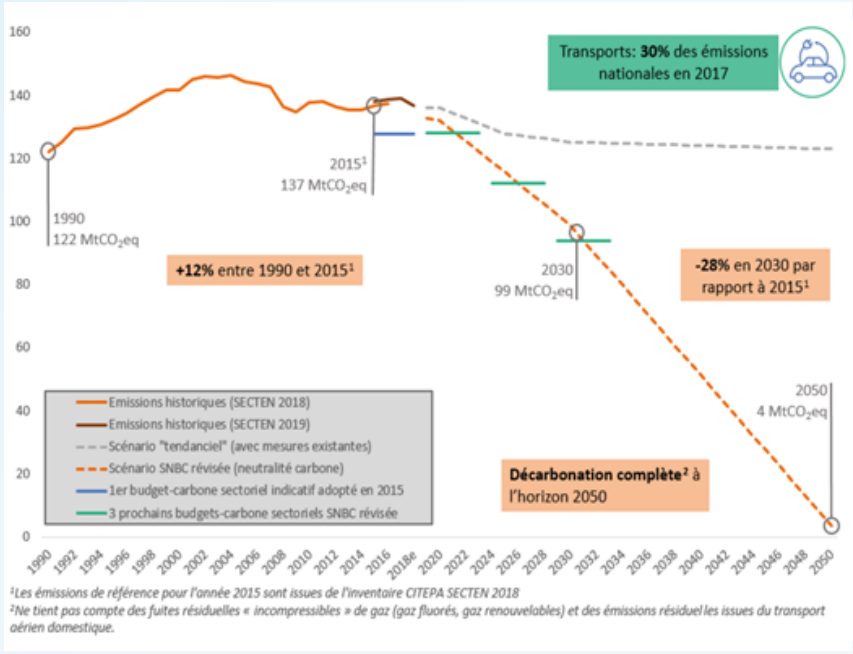
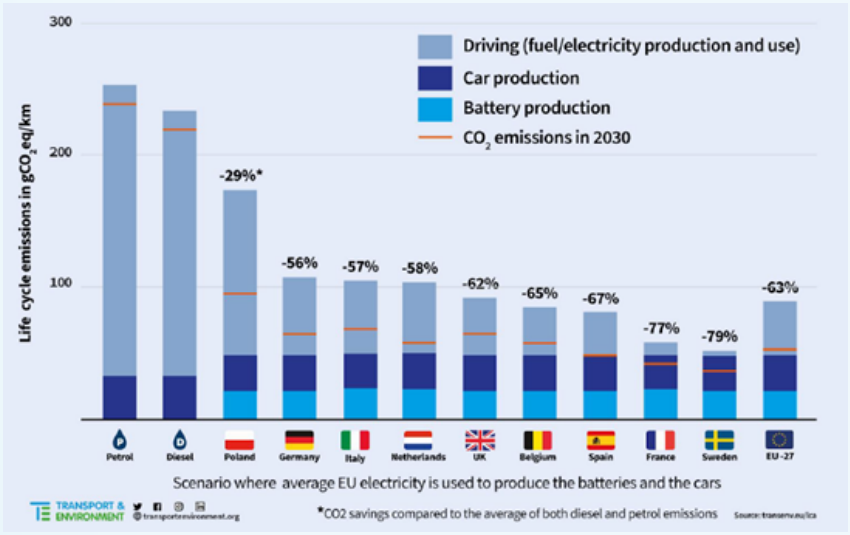


Figure 1 : Trajectoire de réduction des émissions de GES et de leur absorption selon la SNBC France [2].



I Figure 2 : Historique et projection des émissions du secteur des transports entre 1990 et 2050 (en Mt CO2eq) [2].



I Figure 3 : Emission de CO_2 sur le cycle de vie du puits à la roue des véhicules thermiques et électriques dans différents pays d'Europe [3]

pective que la société Nidec PSA emotors, créée en 2018, s'attache à concevoir des moteurs électriques et des onduleurs pour groupes moto-propulseurs (GMP) hybrides et électriques à haut rendement, tout en améliorant les prestations d'agrément de conduite (accélérations vives grâce à des moteurs à forts couples, et pollution sonore réduite).

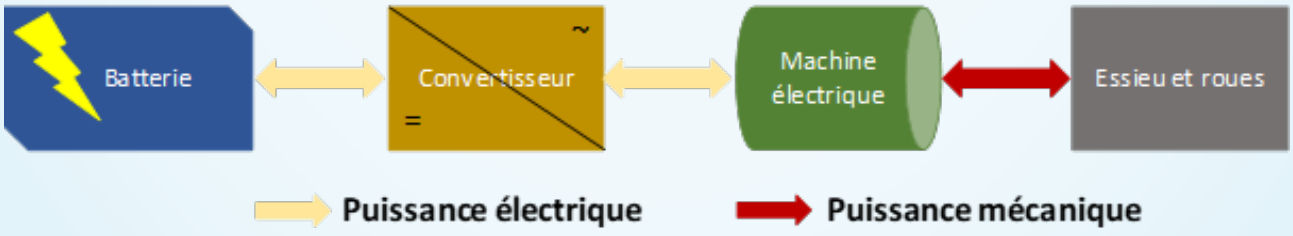
Architectures de véhicules électriques

Ces GMP sont utilisés dans des véhicules suivant différentes configurations. Nous abordons ici les principales architectures de véhicules électrifiés.

Véhicule tout électrique

Historiquement, le premier véhicule à avoir dépassé la barre symbolique des 100 km/h est, un véhicule électrique, la « Jamais Contente », en 1899, qui était propulsé par deux moteurs électriques d'une puissance totale de 50 kW. Cette première architecture est décrite sur la figure 4.

Un élément de stockage d'énergie (batterie) alimente une machine électrique (moteur) pilotée par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance (onduleur). La puissance mécanique en bout d'arbre est ensuite transmise à l'essieu et aux roues par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse qui permet le déplacement du véhicule. À l'inverse, lors des phases de décélération, l'énergie cinétique du véhicule est récupérée par l'intermédiaire de la machine électrique sous



I Figure 4 : Architecture d'une chaîne de traction tout électrique [5].

forme d'énergie électrique. Elle fonctionne alors en génératrice et permet de recharger la batterie. Cette bidirectionnalité intrinsèque d'une machine électrique est un élément clé de la performance énergétique d'un véhicule à motorisation électrique.

Véhicule hybride

Dans le contexte automobile qui nous concerne, l'appellation « hybride » correspond à l'utilisation d'un moteur thermique et d'un ou plusieurs moteurs électriques au sein du véhicule.

L'architecture la plus simple conceptuellement consiste à garder une motorisation thermique sur le train avant du véhicule et équiper le train arrière avec une seconde chaîne de traction électrique indépendante sur l'essieu arrière. Cette deuxième chaîne de traction présente alors l'architecture décrite dans la figure précédente. Cette architecture présente l'avantage de découpler les deux motorisations et d'en simplifier la conception et la gestion. Toutefois, elle présente des difficultés d'intégration sur l'essieu arrière et a l'inconvénient de dupliquer certains composants et d'impacter négativement le coût.

Des architectures de motorisations hybrides plus intégrées se sont donc développées. On trouve ainsi des architectures à hybridation série, à hybridation parallèle et à hybridation à dérivation de puissance ou série/parallèle. La figure 5 présente l'architecture hybride série/parallèle qui est la plus complète et dont on peut dériver les architectures à hybridation série, et à hybridation parallèle.

L'avantage de cette architecture est de pouvoir diviser la puissance fournie par le moteur thermique à travers la transmission. Les configurations sont alors multiples et certaines, très intéressantes, méritent d'être exposées :

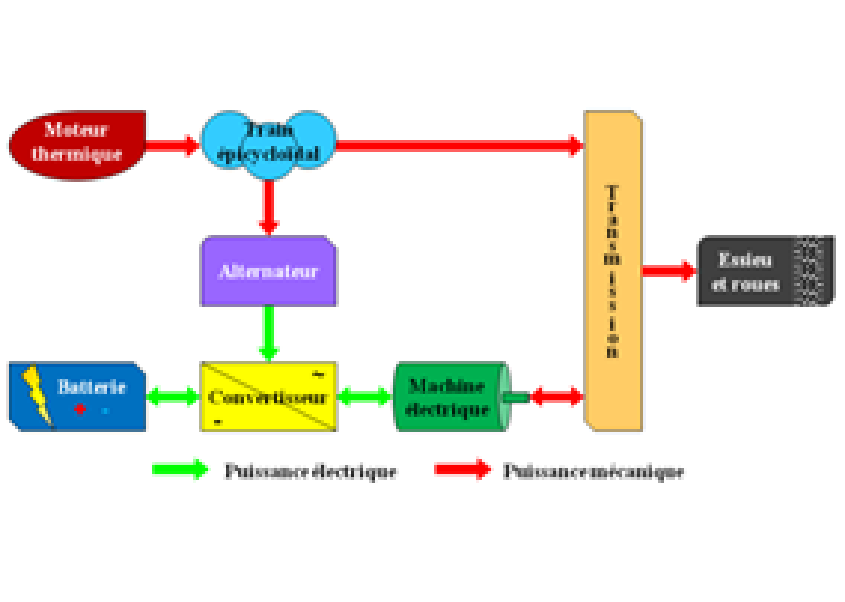
- au démarrage et à vitesse réduite, le moteur électrique est utilisé seul en raison du faible rendement du moteur thermique à basse vitesse. Cela permet un gain en consommation et en CO_2.

- En zone péri-urbaine, la traction se fait par les deux moteurs sans utiliser la batterie. Si la vitesse est maintenue constante, le moteur thermique entraînera l'alternateur qui rechargera la batterie. Cela permet de faire fonctionner le moteur thermique dans une zone de meilleur rendement.

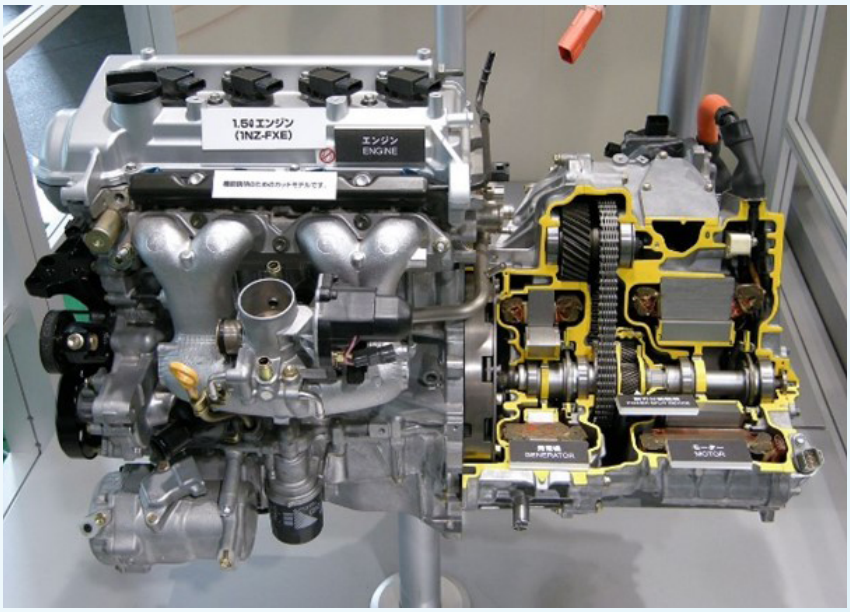
- lors d'une accélération pour un dépassement ou lors d'une longue montée, les batteries alimentent le moteur électrique pour fournir un maximum de puissance au véhicule.

- les décélérations et les freinages permettent de recharger les batteries via la machine électrique fonctionnant en génératrice.

- à l'arrêt, toutes les sources sont coupées.



I Figure 5 : Schéma de principe de l'hybridation série/parallèle [5].



I Figure 6 : GMP hybride série/parallèle « Hybrid Synergy Drive » de Toyota implanté dans ses véhicules hybrides.

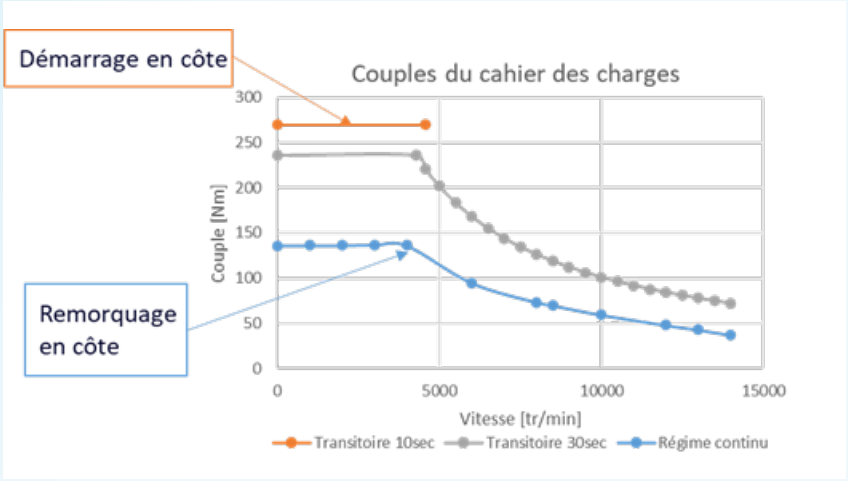


Figure 7 : Enveloppe couple-vitesse du moteur électrique en fonction de la durée de sollicitation.

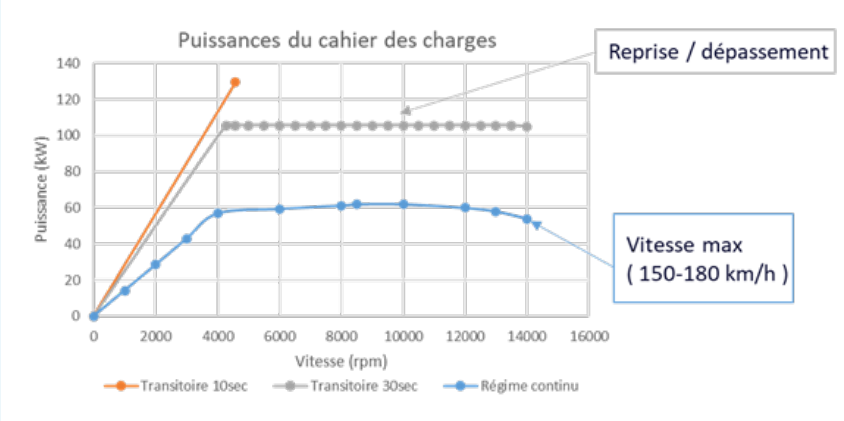


Figure 8 : Enveloppe puissance-vitesse du moteur électrique en fonction de la durée de sollicitation.

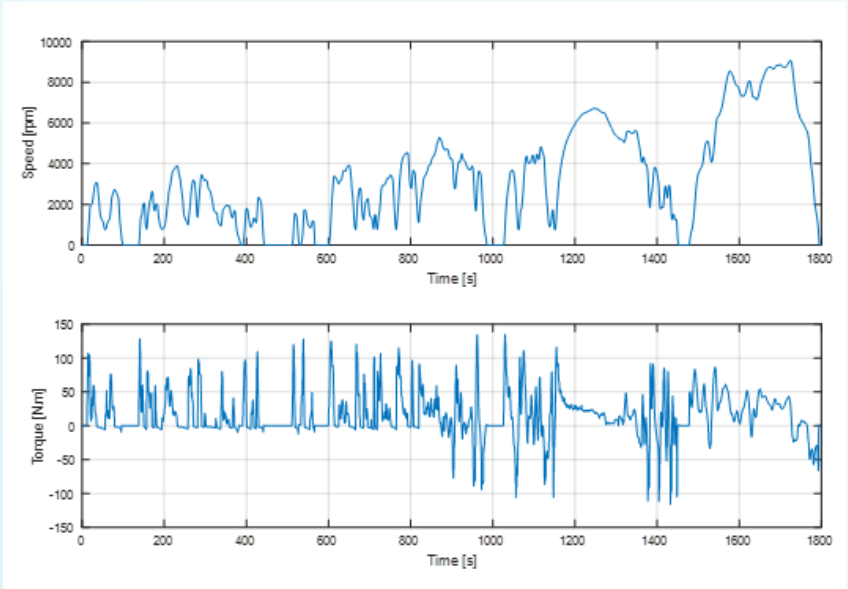


Figure 9 : Evolution du couple fourni par le moteur électrique et de sa vitesse de rotation en fonction du temps selon le cycle WLTC.

Spécification pour véhicules électriques

Pour la suite de la discussion, nous focaliserons les réflexions sur les véhicules tout électrique qui devraient représenter plus de 80% des véhicules électrifiés dans le monde en 2030. Les besoins des GMP électriques doivent être bien identifiés en termes d'usages et de profils de mission afin de concevoir au mieux les moteurs électriques et d'atteindre le meilleur compromis entre coûts et performances de ces composants. Le cahier des charges d'un moteur électrique pour véhicule se compose de plusieurs exigences dont les principales sont données ci-après.

Exigences de performances

Le premier jeu d'exigences concerne les performances du véhicule. Les figures 7 et 8 présentent la traduction de ce besoin dans les espaces couple-vitesse et puissance-vitesse du moteur. On y voit apparaître différents cas de vie, notamment : démarrage en côte, remorquage en côte, reprise/dépassement, vitesse maximale.

Le développement d'un moteur électrique doit permettre d'atteindre tous ces points de fonctionnement que ce soit sur des durées courtes ou en régime permanent.

Exigences d'efficience

Le second jeu d'exigences correspond à l'efficience du moteur électrique dans différentes conditions d'utilisation du véhicule. Un effort de normalisation a été réalisé ces dernières décennies afin de définir un cycle de conduite normalisé. Différents cycles normalisés se sont succédé en passant par le cycle NEDC [1] pour aboutir finalement au cycle WLTC [2] en 2017. Ce cycle intègre différents types d'usage : urbain, péri-urbain, route et autoroute. Il est réglementaire et a pour vertu de permettre au consommateur de pouvoir comparer les différents véhicules en termes de consommation d'énergie, il est représenté sur la figure 9.

1 NEDC : New European Driving Cycle

2 WLTC : Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles

Le développement d'un moteur électrique doit intégrer un objectif d'efficience sur le cycle WLTC afin de contribuer à la performance énergétique globale du véhicule. Cela se traduit par des rendements habituellement compris entre 88 % et 93 % sur le cycle.

A cette exigence de consommation d'énergie sur cycle s'ajoutent des objectifs de limitation des pertes dans les moteurs électriques sur des points de fonctionnement particuliers. En effet, avec la réduction du coût des batteries et l'augmentation de leur capacité, l'utilisation de véhicules électriques pour des trajets routiers et autoroutiers se développe. Il devient donc nécessaire d'optimiser la conversion d'énergie sur ces points de fonctionnement où la puissance est de l'ordre de 10 kW pour rouler sur route à 90 km/h et celle pour rouler sur autoroute à 130 km/h est de l'ordre de 30 kW.

Autres exigences

En outre, il est nécessaire de prendre en compte des contraintes techniques supplémentaires lors de la conception des motorisations électriques. Il s'agit de contraintes d'intégration mécanique, thermique pour s'assurer que le moteur se monte bien sur le châssis et s'interface bien avec le système de refroidissement du véhicule. Il y a également lieu de prendre en compte des spécifications sur le niveau de bruit et de vibration émis par le moteur ainsi que son comportement en cas de dysfonctionnement afin d'assurer la sécurité du véhicule et de ses occupants en cas d'avarie.

"Le développement d'un moteur électrique doit intégrer un objectif d'efficience sur le cycle WLTC afin de contribuer à la performance énergétique globale du véhicule."

L'objectif de la conception doit être de satisfaire au mieux l'ensemble des objectifs et des contraintes en visant le meilleur compromis coût/performances. À ces contraintes techniques, il est impératif d'ajouter les contraintes de fabricabilité de ces moteurs afin d'optimiser les lignes de fabrication en usine. Il est également fondamental d'intégrer la variabilité des prévisions du marché dans la stratégie de conception : vitesse de pénétration des véhicules électriques, spécification du juste besoin, contraintes réglementaires, acceptation sociétale des technologies, géopolitique des ressources naturelles stratégiques… En effet, le niveau d'incertitude lié à l'émergence de ce marché doit être intégré dans la stratégie de définition des produits afin d'avoir la plus grande résilience face à ces aléas.

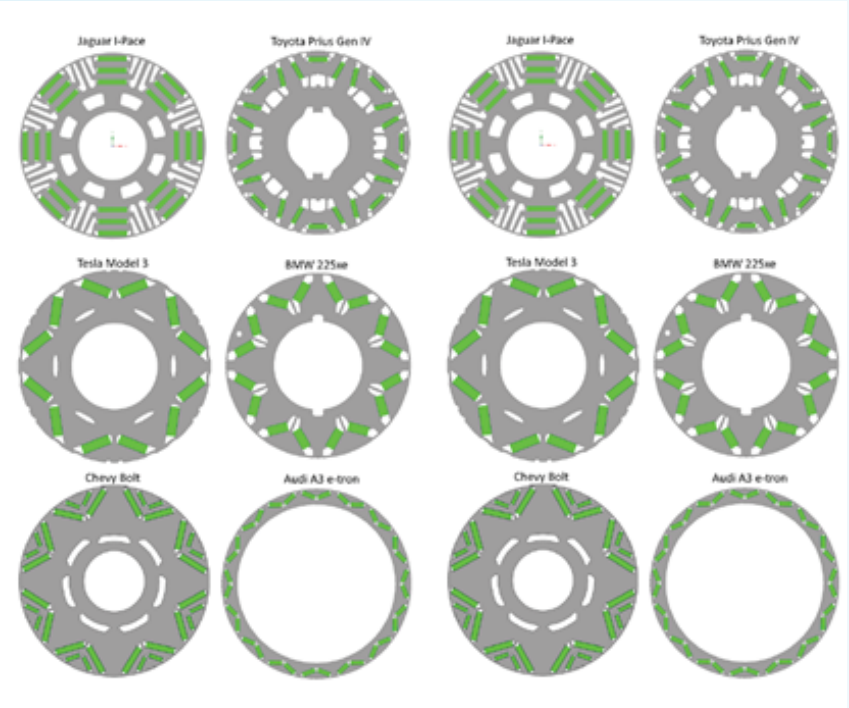
Solutions technologiques actuelles et futures pour les motorisations électriques

Les solutions technologiques actuelles

Les technologies de moteurs électriques permettant de répondre aux besoins spécifiques de véhicules électriques sont principalement les moteurs synchrones à aimants permanents, catégorie la plus représentée, les moteurs synchrones à excitation électrique et les moteurs asynchrones ou dits à induction [6]. Ces trois types de moteur diffèrent dans la manière de générer le couple moteur. Celui-ci possède deux composantes. Une partie du couple est due à l'interaction du champ magnétique créé par le stator (partie statique du moteur) avec le champ magnétique créé par le rotor (partie tournante du rotor). Une seconde composante du couple est générée par

Caractéristiques techniques	Moteur asynchrone	Moteur synchrone à excitation électrique	Moteur synchrone à aimants permanents
Accélération (Couple et Puissance)	+	+	+
Accélération (Couple et Puissance)	-	-	+
Autonomie (Rendement)	- -	+ (sur route)	+ (en ville)
Compacité (Densité de puissance)	-	+	++
Contenu en matières premières	~~Aimants~~ Cuivre	~~Aimants~~ Cuivre	Aimants Cuivre
Mode roue-libre (Couple de trainée)	++	++	- -
Coûts de production	++	-	+

I Tableau 1 : Comparaison de trois types de moteurs électriques alternatifs en termes de performances.



I Figure 10 : Variété de structures de rotors de moteurs synchrones à aimants permanents. Les aimants sont représentés en vert [7].

l'interaction du champ magnétique créé par le stator et par la création de chemins privilégiés pour le passage du flux magnétique dans le rotor.

Ces différents types de technologies présentent un certains de nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont résumés dans le tableau 1.

Comme le montre l'analyse du tableau ci-dessus, les moteurs synchrones à aimants permanents constituent aujourd'hui un compromis technico-économique pertinent. Ils concentrent donc une part importante des activités de R&D ayant pour but de réduire la consommation de matière nécessaire à leur construction et l'amélioration de leur rendement, comme l'atteste la figure 10 qui répertorie les topologies de rotors à aimants permanents en concurrence sur le marché.

Enfin la figure 11 montre une vue éclatée typique d'un moteur de traction pour véhicule électrique afin de visualiser la construction globale de ce type de système.

Les évolutions technologiques à venir

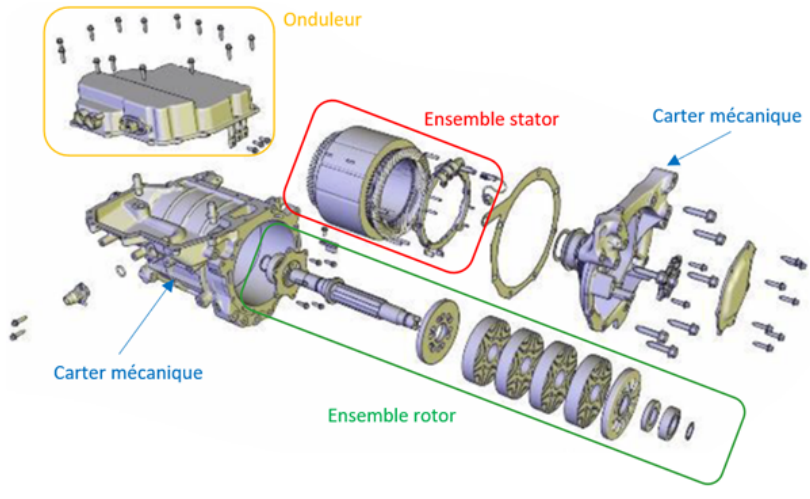
Les motorisations électriques pour véhicules doivent continuer à progresser en termes de coûts et de performances pour accompagner le développement des véhicules électriques. Les voies d'améliorations sont multiples.

La structure électromagnétique des machines constitue un levier, notamment les machines à flux axial qui permettent d'augmenter le couple massique et de réduire le volume des matériaux utilisés dans leur construction.

L'augmentation de la compacité doit s'accompagner d'améliorations sur les architectures des systèmes de refroidissement car l'évacuation de la chaleur générée dans la machine est plus difficile à extraire. La mise en œuvre de refroidissement direct à l'intérieur des moteurs par fluide diélectrique ou l'emploi de matériaux à changement de phase sont à l'étude pour les prochaines générations [8].

Les matériaux magnétiques et électriques sont également mis à contribution. Les évolutions concerneront : des aimants permanents utilisant moins de terres rares lourdes et une meilleure distribution des poudres de fer pour la réalisation de circuits magnétiques 3D, des systèmes d'isolation électriques possédant une tenue en température plus élevée et des caractéristiques diélectriques plus élevées afin de s'accommoder de l'apparition des batteries 800 V adaptées à la recharge rapide.

L'électronique de puissance qui alimente le moteur recèle également de nombreux leviers pour améliorer les performances.



I Figure 11 : Vue éclatée d'un moteur de traction pour véhicule électrique : sous-ensembles principaux.

Au niveau des composants électroniques, les technologies de semi-conducteurs telles que le SiC et le GaN permettent de réduire les pertes dans les onduleurs et d'augmenter les fréquences de fonctionnement. Au niveau du logiciel et du contrôle, il y a également des perspectives notamment concernant les stratégies de commande rapprochée (modulation de largeur d'Impulsion) des interrupteurs de l'onduleur pour minimiser les pertes harmoniques ainsi que les bruits et vibrations du moteur.

Au-delà des avancées technologiques propres à chaque composant (moteur et onduleur), des optimisations au niveau de la chaîne de traction pourront être sources d'améliorations [9]. On peut citer l'augmentation de la vitesse de rotation des moteurs qui permet d'augmenter la puissance massique des motorisations et qui doit s'accompagner de progrès sur les réducteurs de vitesse à fort rapport, d'électroniques de puissance pouvant fonctionner à des fréquences élevées et de matériaux magnétiques à faible pertes. Cela pourra même aller jusqu'à l'utilisation de boîte de vitesses à plusieurs rapports.

Enfin il faudra avoir la capacité de traiter toutes ces innovations technologiques dans un environnement en constante évolution : réduction des temps de recharge, modification des usages intégrant davantage de trajets longs à vitesse plus élevée, tensions potentielles sur l'approvisionnement des matières premières… Cela devra se faire en étoffant les méthodes de conception de GMP électriques en considérant des dimensions plus larges telles que l'impact du choix des matériaux et des méthodes de fabrication pour tendre vers un compromis mêlant coût, performances et impact environnemental.

Conclusion

Porté par la dynamique de déploiement des véhicules tout électrique alimentés par batterie, ou par pile à combustible à plus long terme, le développement des motorisations électriques est en plein essor. Toutefois, ce secteur en émergence est sujet à variabilité et aux incertitudes. Notre rôle est de préparer des technologies de moteurs et onduleurs flexibles qui contribuent à l'amélioration des performances des chaînes de traction, tout en en maîtrisant le coût, afin de contribuer aux efforts de réduction des émissions de GES. Cette transition devra accompagner les changements sociétaux des utilisateurs et les évolutions dans les métiers de l'automobile en favorisant une mutation des compétences du monde thermique vers celui de l'électrique. ■

Références

[1] The Shifters, Synthèse du rapport AR6 du GIEC publié le 09/08/2021, Août 2021
[2] Stratégie nationale bas-carbone, La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone – Synthèse, Ministère de la transition écologique et solidaire, Mars 2020
[3] Fédération Européenne pour le Transport et l'Environnement, "How clean are electric cars?", Avril 2020
[4] J.-P. Hauet, « Vers les mobilités propres », REE 2019-1
[5] B. Dagusé, « Modélisation analytique pour le dimensionnement par optimisation d'une machine dédiée à une chaîne de traction hybride à dominante électrique », Thèse Supélec, 17/06/2013
[6] X. Rain, « Les solutions actuelles de motorisations pour véhicules électriques, Culture Sciences de l'Ingénieur », Ecole normale supérieure Paris-Saclay, 16/03/2020
[7] A. Krings, C. Monissen, « Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles », IEEE ICEM 2020
[8] P.-O. Gronwald and T. A. Kern, « Traction Motor Cooling Systems: A Literature Review and Comparative Study», IEEE Transactions on Transportation Electrification, Dec. 2021
[9] A. El-Refaie, M. Osama, « High Specific Power Electrical Machines: A System Perspective », IEEE Trans. On Electrical Machines and Systems, March 2019

Les auteurs

Xavier Jannot est né à N'Gaoundéré (Cameroun) en 1985. Il est diplômé de Supélec en 2007 en Systèmes énergétiques. En 2010, il obtient un diplôme de Doctorat Supélec en Physique sur la thématique de la modélisation et de l'optimisation d'un ensemble convertisseur-machine appliquées aux systèmes d'entraînement à haute vitesse.
Il rejoint Emerson Leroy-Somer en 2010 où il occupe plusieurs postes de R&D dans la conception de nouveaux produits dans le domaine des moteurs et des alternateurs industriels. En 2018, il rejoint Nidec PSA emotors en tant que responsable Recherche & Prédéveloppement, en charge du développement de nouvelles technologies de machines électriques pour véhicules hybrides et électriques.

Cédric Plasse est né à Paris en 1966. Il est diplômé de l'Université de Technologie de Compiègne en 1991 en robotique et systèmes d'entraînements électriques. Après son service militaire à la Direction des Constructions Navales, il rejoint Valeo en 1993 où il occupe plusieurs postes à responsabilité dans la conception et la R&D dans le domaine des alternateurs, de l'électronique de puissance, des alterno-démarreurs et des systèmes hybrides légers. En 2009, il rejoint Emerson Leroy-Somer en tant que Directeur de l'innovation puis Vice-président Technologie, avec la responsabilité des développements des nouveaux produits pour les alternateurs, les moteurs et les électroniques de puissance industriels. Il a été nommé CTO de Nidec PSA emotors en 2018, avec la responsabilité de développer une gamme de moteurs et d'onduleurs pour véhicules hybrides et électriques.

MAISON d'AMPÈRE

André-Marie Ampère (1775-1836), mathématicien, physicien, chimiste et philosophe, a passé sa jeunesse à Poleymieux au Mont d'Or.

Musée, lieu de rencontre et acteur du progrès des sciences et techniques

La Maison d'Ampère abrite le Musée de l'Electricité créé en 1931 ou sont présentés :

- des expériences sur l'électricité et le magnétisme,
- des ateliers-découverte,
- des machines et instruments retraçant l'histoire de l'électricité,
- des documents sur la vie du savant et de sa famille.

Grâce au développement et à la modernisation de ses équipements, la Maison d'Ampère accueille :

- des groupes scolaires (plus de 1000 visiteurs chaque année), pour une douzaine d'ateliers-découverte de l'électricité :
  - construction d'une pile,
  - mesure de consommation des appareils du quotidien,
  - utilisation d'un panneau photovoltaïque,
  - programmation d'un petit robot,
- des entreprises et associations pour des réunions (50 places),
- des expositions, des conférences, …

http://amperemusee.fr/

Présentant les avancées dans les énergies durables (éolien, solaire, hydroélectrique), la Maison d'Ampère s'intéresse aussi développement de la mobilité électrique.

L'ancienne borne de recharge sur le parking du musée sera remplacée, grâce à l'appui de la commune de Poleymieux, par la première borne de nouvelle génération de la Métropole de Lyon.

Avec le SEE, la Maison d'Ampère a conduit la célébration en 2020 du bicentenaire des découvertes d'Ampère en électrodynamique : notion de « courant électrique », les lois d'interaction entre courants et aimants.

- Avec la SEE, la Maison d'Ampère a conduit la célébration en 2020du bicentenaire des découvertes d'Ampère en électrodynamique : notion de « courant électrique », les lois d'interaction entre courants et aimants.
- La commémoration « Ampère 200 ans » a débuté à Lyon en janvier 2020.

Elle a permis de réaliser de nombreuses manifestations depuis plus de 2 ans malgré la situation sanitaire. Elle s'achève à Paris en avril 2023 avec une cérémonie au Collège de France où Ampère a occupé la chaire de Physique générale et expérimentale.

www.ampere200ans.fr

Intégration et modularité des chaînes de conversion électromécaniques

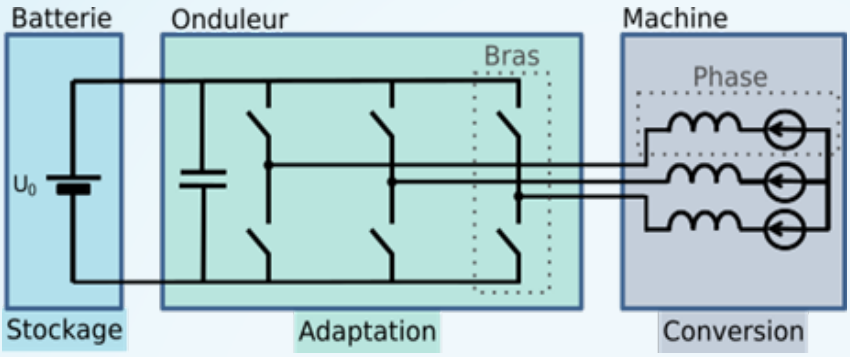
Antoine Cizeron,
Doctorant, Université Paris Saclay
Javier Ojeda,
Enseignant-chercheur, Université Paris Saclay
Olivier Béthoux,
Professeur, Sorbonne Université

Le thème sociétal de la mobilité électrique fédère des partenariats fertiles entre les laboratoires de recherche de Génie Electrique et de nombreux industriels. En particulier, les laboratoires GeePs et Satie participent à de nombreux projets collaboratifs ou sont engagés dans des contrats directs portant, entre autres, sur des convertisseurs d'électronique de puissance et des machines électriques dédiées au secteur de l'automobile ou à la génération de bord dans les aéronefs. Forts de cette expérience industrielle et de leur expertise scientifique, ces deux laboratoires franciliens unissent leurs efforts pour développer un concept innovant de « Chaîne de traction à alimentation fractionnée (CTAF) ». Celui-ci vise à reconsidérer, en profondeur, l'association des trois organes essentiels des chaînes de conversion électromécanique : la batterie, l'onduleur et la machine. Ce nouveau concept est protégé par un brevet international et conduit à une approche holistique du système.

Contexte

Afin de correspondre aux standards de confort et d'utilisation instaurés par l'usage massif du véhicule thermique, le véhicule électrifié doit encore accroître son autonomie. Certes, la comparaison n'est pas évidente du fait des différences importantes concernant les densités d'énergie embarquée et le rendement des deux technologies. La chaîne de traction d'un véhicule thermique est pénalisée par un faible rendement (de l'ordre de 15 % sur cycle d'usage typique) mais consomme un carburant énergétiquement très dense (> 10 kWh/kg) et extrêmement rapide à transférer d'un réservoir à l'autre. Inversement, celle d'un véhicule électrifié possède un rendement bien supérieur et sa réversibilité lui permet la récupération de l'énergie de freinage, mais les solutions de stockage sont beaucoup moins denses (< 1 kWh/kg pour l'accumulateur lithium-ion, < 5 kWh/kg pour le dihydrogène). Il en résulte que les véhicules électrifiés présentent une masse plus importante que celle des véhicules thermiques. À titre d'exemple, la Peugeot 208 Puretech 75 a une masse de 980 kg pour plus de 700 km d'autonomie tandis que la Peugeot 208 électrique pèse 1455 kg pour 360 km d'autonomie. Cette remarque justifie l'effort consenti dans le développement de solutions de stockage électrochimique plus denses et des technologies de recharge plus rapides, afin de réduire les écarts d'usages entre les différents types de véhicules.

En attendant la rupture technologique, la demande déjà très significative de véhicules électrifiés nécessite l'orientation du parc industriel vers la production de chaînes de conversion électromécaniques technologiquement matures. La solution généralement adoptée se décompose en trois organes : une source de tension continue, un convertisseur d'électronique de puissance et une machine électrique. Ces trois éléments, répondant à leurs propres cahiers des charges, sont logés dans des carters disjoints et sont ensuite raccordés par des connectiques externes. Pour chacun de ces éléments, il est possible d'identifier une technologie qui, aujourd'hui, s'impose industriellement. La chaîne de conversion est donc généralement composée d'une batterie d'accumulateurs lithium-ion, d'un onduleur de tension à deux niveaux et d'une machine électrique, très souvent de type synchrone à aimants ●●●



I Figure 1 : Chaîne de conversion électromécanique usuelle.

permanents pour obtenir une puissance massique élevée. La figure 1 schématise cette association en précisant les fonctions des trois constituants.

Cette structure d'alimentation n'est pas propre à l'automobile, on la retrouve dans toute application nécessitant l'entraînement à vitesse variable d'un système mécanique, comme de nombreux procédés industriels : ventilation, pompage, étirement, convoyage, etc. Indépendamment de l'application, force est de constater, que chacun de ces trois éléments est, déjà en soi, un système complexe dont le développement fait appel à des compétences scientifiques relativement distinctes. Pour la solution de stockage, il s'agit d'atteindre des densités d'énergie importantes tandis que pour l'onduleur et la machine, l'enjeu est d'accroître la densité de puissance. En revanche, la fiabilité et le rendement sur cycle sont bien évidemment des problématiques communes.

Aux interfaces des expertises du génie électrique

Aborder la conversion électromécanique comme plusieurs sous-systèmes interconnectés (figure 1) se traduit également dans l'organisation des laboratoires de recherche comme celle des équipes scientifiques industrielles. Cette structure organisationnelle a ses limites, qui sont particulièrement visibles lorsqu'une rupture technologique bouscule les interactions entre les différents constituants.

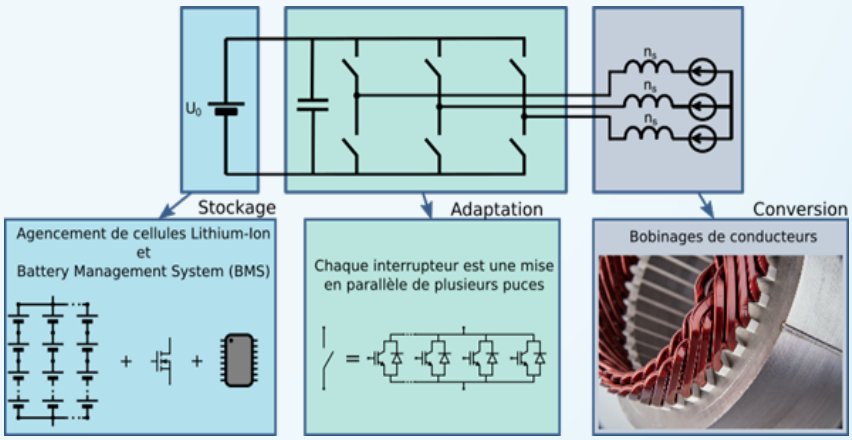
L'arrivée à maturation de composants fondés sur des semi-conducteurs dits à « large bande interdite » est un exemple emblématique des répercussions engendrées par ces multiples interactions. Ces nouveaux interrupteurs d'électronique de puissance effectuent des commutations très rapides, permettent une meilleure conduction thermique et sont le siège de pertes réduites. Ces excellentes propriétés autorisent une augmentation significative de la fréquence de découpage de l'onduleur, voie principale empruntée pour l'accroissement de la densité de puissance de celui-ci. En revanche, ces mêmes transitoires, beaucoup plus rapides, produisent d'une part, des perturbations électromagnétiques risquant de déstabiliser les autres dispositifs électroniques et, d'autre part, des sollicitations électriques qui peuvent dégrader la machine électrique. En effet, les commutations de l'électronique génèrent des fronts de tension risquant de détériorer les isolants des conducteurs et de réduire la durée de vie des roulements mécaniques de cette même machine par arrachement de matière.

C'est donc bien au travers d'une réflexion globale, intégrant explicitement les interfaces entre les différents domaines scientifiques, que la chaîne de conversion électromécanique doit être conçue. Cette approche holistique doit donc, sans complexe, revisiter l'ensemble des interactions entre ses différents sous-systèmes. Ces dernières font, de fait, partie intégrante de l'optimalité du système.

De la granularité à la modularité

En adoptant ce nouveau cadre de réflexion, des projets de recherche, tant académiques qu'industriels, s'orientent vers la conception d'ensembles batterie-onduleur [1] ou onduleur-machine [2] intégrés. Ces nouvelles approches se fondent sur l'idée que chacun des constituants de la chaîne de conversion électromécanique (figure 1) est d'ores et déjà constitué d'un grand nombre de cellules élémentaires. Aborder la problématique de la bonne granularité est donc une variable d'optimisation du système.

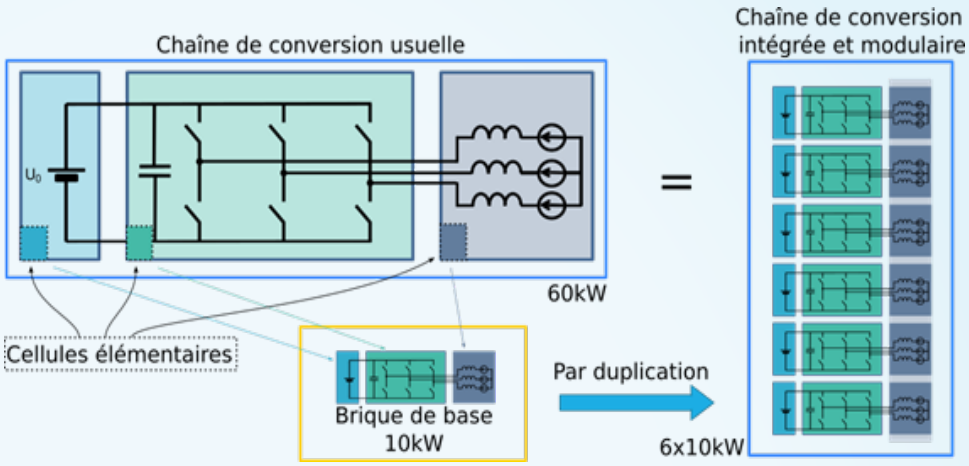
Le cas le plus parlant est celui de la batterie d'accumulateurs (> 400V) qui est en fait l'agencement en série de dizaines de modules (quelques dizaines de volts), chacun



I Figure 2 : Granularité des différentes fonctions de la chaîne de conversion électromécanique usuelle [3].

composé de plusieurs cellules lithium-ion (≃4V). Le pack batterie comporte également une électronique de commande et de puissance, dédiée à l'équilibrage et à la sécurité des cellules : le *Battery Management System* (BMS). La machine électrique, quant à elle, possède plusieurs phases, chacune réalisée à partir de la mise en série ou en parallèle de bobines, elles-mêmes composées de plusieurs spires conductrices. Enfin le convertisseur d'électronique de puissance dispose d'autant de bras que la machine possède de phases ; chacun de ces bras est réalisé à partir de la mise en parallèle de plusieurs puces semi-conductrices permettant d'atteindre le courant nominal requis. Il faut noter également le développement de structures multi-niveaux qui requièrent un nombre encore plus important d'interrupteurs. Ces considérations sur les granularités locales sont représentées au travers de la figure 2.

Actuellement, les trois constituants de la chaîne de traction sont dimensionnés pour la puissance nominale du système et ensuite interconnectés. Une alternative possible serait donc d'effectuer ce raccordement à l'échelle des cellules élémentaires de chacune de ces trois fonctions : stockage, adaptation et conversion (figure 1). Cette alternative est envisagée pour une intégration avancée de l'ensemble batterie-onduleur-machine. Ainsi, l'intégration des différentes fonctions de la chaîne de conversion électromécanique s'appuierait sur ces trois granularités et conduirait à l'adoption d'une solution modulaire réalisée par l'assemblage d'un grand nombre de briques de base ; la brique de base étant l'association d'une cellule élémentaire de chacun des trois éléments décrits à la figure 2. L'enjeu industriel qui en découle, est clairement la standardisation de la production. Celle-ci permet l'amélioration des procédés de fabrication comme ceux de réutilisation ou de destruction en produisant, et recyclant, en grande série une brique de base de faible puissance fiabilisée, et qui, par duplication, formerait un système complet adapté à tout type de cahier des charges (figure 3).



I Figure 3 : Conception de la brique de base, constituant la chaîne de conversion électromécanique intégrée et modulaire.

D'un point de vue fonctionnel, la brique de base assure de manière autonome le stockage, l'adaptation tension-courant et la conversion électromécanique d'une partie de l'énergie totale du système. Une optimisation doit être menée afin de déterminer l'échelle pertinente à laquelle doit être conçue cette brique de base, en considérant les réalités technologiques contraignant chacun des trois éléments (figure 2).

Modularité de la batterie

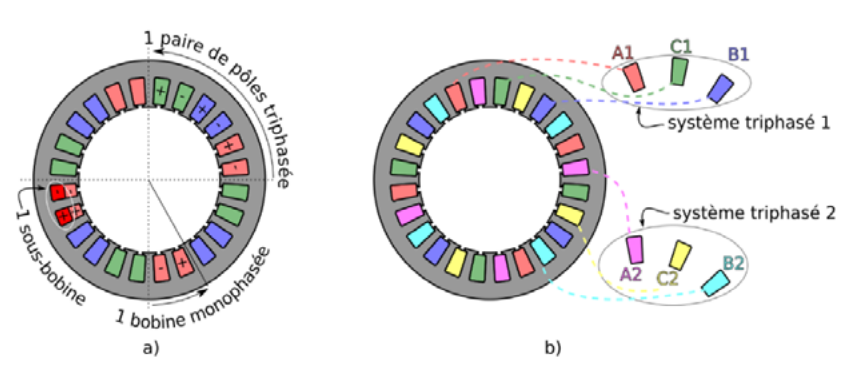
La batterie peut être décomposée à l'échelle du module (quelques dizaines de volts) ou à l'échelle de la cellule (de l'ordre de quelques volts). Cependant, pour orienter la modularité vers un nombre de briques de base réaliste - de l'ordre de la dizaine - la batterie d'accumulateurs peut tout d'abord être scindée en plusieurs modules. Dans la structure usuelle, l'équilibrage des différents modules est assuré par une électronique intégrée au pack batterie (le BMS) qui est en général dissociée de l'électronique de puissance liée à l'onduleur. Afin de ne considérer qu'une seule et même électronique pour l'équilibrage des modules et la génération d'une tension alternative alimentant la machine, une structure multi-niveaux peut être adoptée [4]. Dans cette structure chaque module de batterie est associé à son propre convertisseur basse-tension. La tension alimentant le moteur est ensuite obtenue grâce à la mise en série de nombreux convertisseurs élémentaires. Cela constitue une possibilité d'intégration de l'ensemble batterie-onduleur.

Dans ce type de structure modulaire, il est possible de profiter du fait que chaque module de batterie est associé à son propre onduleur pour gérer l'équilibrage des différents modules. Cela permet d'associer deux fonctions à un même convertisseur d'électronique : la gestion de l'équilibrage et l'alimentation de la machine. Il est donc possible de se passer de l'électronique dédiée à la gestion de la batterie, présente dans la structure usuelle.

Modularité de la machine électrique

Pour ce qui concerne la machine électrique, une décomposition de ses bobinages peut également être envisagée. Cela ouvre la possibilité d'associer plusieurs onduleurs à une même machine. Ceux-ci, d'une puissance nominale réduite, sont donc peu volumineux et plus faciles à intégrer directement au sein de la machine. La mutualisation des systèmes thermiques de refroidissement peut donc être envisagée.

Plusieurs méthodes de fractionnement des bobinages sont employées dans la littérature. Comme le montre la figure 4a, il est possible de segmenter les bobinages



I Figure 4 : Deux types de fractionnement des bobinages d'un stator de machine électrique : a) segmentation des bobinages d'une machine triphasée, b) regroupement des bobinages d'une machine multiphasée en plusieurs systèmes triphasés.

selon les différentes paires de pôles de la machine triphasée. La figure 4b illustre une autre approche de fractionnement qui consiste à regrouper des phases d'une machine multiphasée en plusieurs sous-systèmes triphasés indépendants. Si le nombre de phases de la machine multiphasée est un multiple de trois, plusieurs onduleurs triphasés peuvent être employés pour alimenter la même machine. Rappelons que le triphasé est, pour l'énergie électrique, un standard.

Au travers de la segmentation des bobinages triphasés (figure 4a), un onduleur peut être associé à chacun des secteurs de la machine [5]. Une alternative consiste en l'utilisation d'onduleurs monophasés en pont complet pour alimenter chaque bobine de la machine [6]. Enfin, pour aller vers une segmentation encore plus profonde, plusieurs sous-bobines peuvent être alimentées indépendamment au sein de chaque encoche, ce qui soulève, à terme, la problématique de l'alimentation de la spire conductrice unique [7].

Ces considérations sur les degrés de liberté concernant le fractionnement des machines électriques ont donné naissance à de nombreux projets académiques et industriels sur l'intégration de l'ensemble convertisseur-machine. Les principaux avantages associés à ce type de structure sont une continuité de service accrue reposant sur la possibilité de fonctionner en dépit de la perte d'une portion de la machine, ainsi qu'un degré de liberté supplémentaire permettant le contrôle des efforts mécaniques radiaux, autorisant éventuellement la suppression des roulements mécaniques. De plus, les convertisseurs élémentaires employés peuvent présenter des calibres en tension plus faibles que l'onduleur traditionnel (figure 1). Cette possibilité d'abaissement de la tension d'alimentation est un levier pour réduire les perturbations électromagnétiques générées et les sollicitations appliquées aux isolants électriques de la machine. Cette réduction des calibres en tension permet le choix technologique de composants semi-conducteurs à faibles pertes et bonne conduction thermique. Bien entendu, un compromis doit être trouvé entre l'augmentation du nombre de composants et les pertes globales qui leur sont associées. Il faut noter que l'accroissement du nombre de composants amène généralement à une amélioration de la fiabilité du système global, malgré l'augmentation de la probabilité d'occurrence de la défaillance d'un composant. [8]

Enfin, la thématique du contrôle de la structure doit faire partie intégrante du processus de conception afin de limiter au maximum le nombre de capteurs, en tirant partie des couplages physiques existant entre les différentes briques de base. L'architecture de contrôle peut être construite aussi bien autour d'une gestion autonome des différentes briques que d'une supervision globale du système par un calculateur central. [9]

Les auteurs

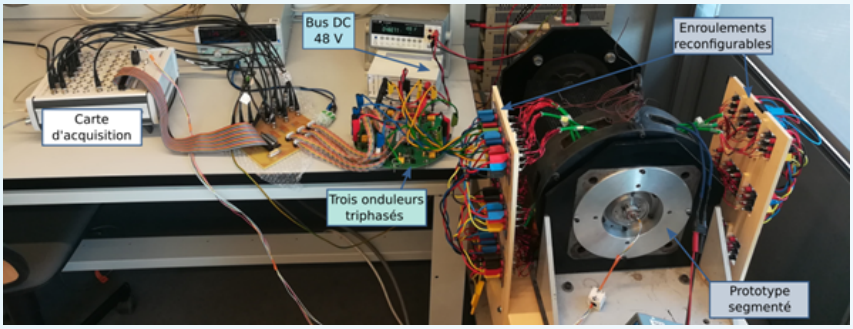
Antoine Cizeron est diplômé de l'ENS Paris-Saclay (2019) et prépare actuellement un doctorat à l'Université Paris-Saclay entre les laboratoires GeePs et Satie. Ses travaux portent sur le fractionnement des chaînes de traction électrique concernant les machines électriques et l'électronique de puissance.

Javier Ojeda est docteur de l'ENS Cachan (2009). Depuis 2010, il est enseignant-chercheur en génie électrique entre le laboratoire Satie et le département enseignement-recherche Nikola Tesla de l'ENS Paris-Saclay. Ses activités de recherche portent sur la modélisation et le contrôle des machines multiphasées.

Olivier Béthoux est diplômé de l'école Centrale Lille (1990) et docteur de de l'Université de Cergy-Pontoise (2005). Après avoir commencé sa carrière chez Alstom en tant qu'ingénieur de recherche, il a été professeur agrégé à l'ENSEA puis maître de conférences à l'Université Paris-Saclay. Depuis 2017, il est professeur à Sorbonne Université et au laboratoire GeePs.Ses principales activités de recherche concernent l'analyse, la conception, le contrôle et le diagnostic des défauts de systèmes fondés sur l'énergie électrique. En plus de l'électronique de puissance et des machines électriques, il s'est largement impliqué dans le développement de systèmes piles à combustibles et générateurs photovoltaïques.

Preuve de concept du projet CTAF porté par le GeePs et le SATIE

Un brevet international a été déposé par le CNRS à la demande des laboratoires GeePs et SATIE sur un type de fractionnement de la machine électrique per-



I Figure 5 : Démonstrateur associant plusieurs onduleurs triphasés basse-tension à une machine électrique segmentée et reconfigurable.

mettant d'accroître le nombre de cellules élémentaires employées [7]. Pour illustrer ce concept, un prototype de machine électrique permettant l'implémentation de tous les types de segmentation a été réalisé et mis en œuvre (figure 5). Il autorise l'étude de différentes configurations de bobinages et de plusieurs échelles de fractionnement, allant de la paire de pôles à la portion d'encoche (figure 4a). Ce prototype reconfigurable permet de caractériser les phénomènes liés à chaque type de fractionnement et de délimiter les zones d'intérêt des degrés de liberté introduits par cette modularité étendue.

Cette preuve de concept est un outil clé pour affermir notre démarche scientifique de prospection du champ des possibles. En démontrant la pertinence de développements issus de modèles, elle autorise une approche complémentaire de la théorie en suscitant aussi de nouvelles interrogations et pistes d'étude. En revanche, cette preuve de concept, par sa haute modularité induisant un nombre important de connectiques, ne permettra pas d'illustrer l'intégration aboutie des fonctions. Ce rôle incombera à un futur banc expérimental, construit autour d'un cas d'usage particulièrement pertinent pour le concept novateur étudié.

Enjeux et voies de progrès actuels

Repenser la chaîne de conversion électromécanique au-delà des trois constituants élémentaires ouvre la perspective d'une refondation fertile de ce système. Cette démarche holistique permet de révéler de multiples degrés de liberté tant pour la conception du système que pour son contrôle en temps réel. Poussés par une ambition d'intégration des fonctions et de standardisation des constituants de la chaîne de conversion électromécanique, industriels et scientifiques conjuguent leurs efforts et leur créativité pour aboutir à une solution améliorée et enrichie par rapport aux solutions actuellement en production. L'enjeu est d'explorer le champ des possibles en tenant compte des contraintes technologiques (figure 2).

Dans ce foisonnement d'idées, le CNRS à travers ses deux laboratoires franciliens de Génie Electrique, le GeePs et le SATIE, continue à apporter des solutions innovantes et réalistes vis-à-vis de leur mise œuvre industrielle. Notons, à ce stade, que l'intégration de l'ensemble batterie-onduleur-machine reste un problème ouvert, nécessitant des efforts prospectifs. La problématique scientifique principale est de caractériser les différentes échelles auxquelles la brique élémentaire peut être conçue. Chaque échelle correspond à des technologies distinctes, en particulier pour l'électronique de puissance. Une optimisation doit être menée afin de proposer une structure modulaire plus performante que la structure traditionnelle. Enfin, les variables de réglage supplémentaires, nées de cette nouvelle granularité, permettent d'affiner la gestion énergétique et offrent la promesse d'une amélioration des performances de la chaîne de conversion en mode sain comme en mode dégradé. ■

Références

[1] IBIS Intelligent Battery Integrated System https://librairie.ademe.fr/mobilite-et-transport/683-ibis-intelligent-battery-integrated-system.html

[2] Automotive Council UK, Power Electronics Roadmap 2020, V1.0 (Consulté le 01/04/2022) https://www.apcuk.co.uk/app/uploads/2021/09/https.www.apcuk_.co_.uk_app_uploads_2021_02_Exec-summary-Technology-Roadmap-Power-Electronics-final.pdf

[3] Aumann, Hairpin stators, (Consulté le 01/04/2022) https://www.aumann.com/en/services/industry-solutions/e-mobility-automotive/electric-drive/hairpin-stators/

[4] C. Mayet et al., «Simulation and Control of a New Integrated Battery System for Automotive Applications,» PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021, pp. 1-6.

[5] G. Sala et al., «Power-Sharing Control in Bearingless Multi-Sector and Multi-Three-Phase Permanent Magnet Machines,» in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 10, pp. 9070-9080, Oct. 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3026273.

[6] Fraunhofer IISB (Fraunhofer Institute for integrated Systems and device technology) EMiLE : Electric motor integrated power electronics with Smart Stator Teeth : https://www.iisb.fraunhofer.de/content/dam/iisb2014/en/Documents/Research-Areas/vehicle_electronics/FraunhoferIISB_Product-Sheet_FE_EMiLE_1V3_WWW.pdf

[7] L. Quéval et al., «Electric Traction Chain with Segmented Power Supply,» 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe), 2021, pp. 1-10.

[8] J. W. Zapata et al., «Multilevel Converter for 4.16- and 6.6-kV Variable Speed Drives,» in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 3, pp. 3172-3180, March 2021, doi: 10.1109/TPEL.2020.3014899.

[9] M. Mannes Hillesheim et al., "Eigendecomposition of a digital iterative decentralised interleaving for multicellular converters", Mathematics and Computers in Simulation, Volume 184, June 2021, Pages 82-105.

Mise en œuvre industrielle du concept "*vehicule-to-grid*" (V2G) : participation au réglage de la fréquence du système électrique

Paul Codani,
Responsable projet, DREEV
Marc Petit
Professeur à CentraleSupélec

Longtemps considérée comme peu réaliste, l'idée d'utiliser les batteries des véhicules électriques pour un soutien au réseau électrique a fait peu à peu son chemin après une identification des services les plus pertinents. Mais pour passer à une mise en œuvre réelle, encore fallait-il développer une solution technologique industrialisable et certifiée.

L'indispensable équilibre offre-demande du système électrique

L'équilibre offre-demande et fréquence, un lien très fort

La stabilité d'un système électrique alternatif repose sur plusieurs critères. Parmi ceux-là il y a le maintien de la fréquence de l'onde de tension à la valeur nominale (50 Hz ou 60 Hz selon les zones). La fréquence du réseau est utilisée – entre autres – comme grandeur de synchronisation de certaines horloges. Une fréquence mal maîtrisée conduit à des avances ou retards de ces horloges. Ce sujet avait donné lieu à des articles dans la presse en mars 2018, à la suite de retards observés de près de six minutes. En Europe, à la fréquence de référence de 50 Hz, une période dure 20 ms ; mais si la fréquence augmente la cadence augmente et les horloges prennent de l'avance. Par ailleurs des équipements électrotechniques tels que les machines synchrones ou transformateurs sont optimisés pour la fréquence nominale.

La fréquence est une grandeur particulière en ce sens où elle est unique sur un système électrique (en chaque point du réseau la mesure est la même). Cette fréquence fixe aussi la vitesse de rotation des alternateurs des groupes de production (principe physique d'une machine synchrone). Or en considérant l'ensemble des alternateurs (qui sont des convertisseurs mécanique-électrique) du système électrique, il est possible d'écrire l'équation électromécanique suivante :

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{J.\Omega^2}{2}\right) = P_{méca} - P_{élec} \quad (1)$$

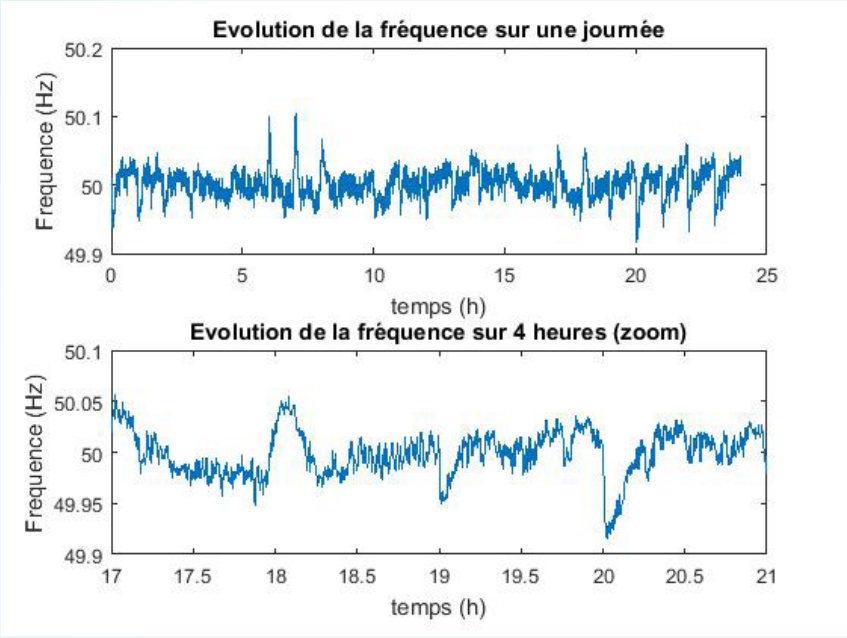
où $P_{élec}$ est la puissance nette soutirée par le réseau (pertes incluses mais déduction faite de l'apport des productions interfacées par des convertisseurs électroniques), $P_{méca}$ est la puissance transmise par les turbines aux alternateurs, J l'inertie apportée par l'ensemble des masses tournantes. Cette équation montre que tout écart sur le terme de droite induit une variation de l'énergie cinétique, donc de la vitesse et donc de la fréquence. Ainsi la fréquence est l'indicateur d'un écart entre l'offre (production turbines) et la demande. L'analyse des données de fréquence [1] montre que celle-ci varie en permanence (figure 1), mais que les actions de contrôle en temps réel permettent – hors incidents notables – de la contenir dans une bande [49,95 – 50,05] pendant 97 % du temps [2] (l'ENTSOe impose sur une année une durée cumulée inférieure à 15 000 minutes pour un écart supérieur à 50 MHz).

Comment régler la fréquence du système électrique ?

Il est indispensable de mettre en place des actions de réglage automatique à très court terme (secondes et minutes) pour faire face à tout écart de fréquence. Ces écarts sont dus à la variation naturelle de la demande et de la production variable (principalement éolien ou photovoltaïque), mais il est aussi impératif de faire face à des incidents qui seraient susceptibles de remettre en cause la stabilité du système et de conduire à un black-out partiel ou total (par exemple dû à la perte subite d'unités de production). En Europe, et comme pour toutes les zones du monde, le réglage de la fréquence s'appuie sur trois ●●●

1 RTE, https://www.services-rte.com/fr/telechargez-les-donnees-publiees-par-rte.html

2 Rapport ENTSOe, Load-frequency control, annual report 2018 or 2019



I Figure 1 : Exemple d'évolution de la fréquence du système électrique européen (données RTE).

séquences qui en France ont longtemps été dénommées réglages primaire, secondaire et tertiaire. L'intégration européenne a conduit à une nouvelle formulation : *frequency containment reserve* (primaire), *automatic frequency restoration reserve* (secondaire), et *manual frequency restoration reserve* et *replacement reserve* (tertiaire). Les deux premières réserves visent respectivement à contenir la fréquence en cas d'évolution importante à la hausse ou à la baisse, alors que la seconde suivra pour restaurer cette fréquence à la valeur nominale. Le rôle de chacune de ces réserves est clairement illustré sur le site de la commission de régulation de l'énergie (CRE) [3].

Dans le cadre de cet article, nous allons nous concentrer sur le réglage primaire de fréquence. Usuellement ce réglage était assuré par des groupes de production qui devaient pouvoir moduler leur point de puissance (ΔPi) autour d'un point de fonctionnement P_{i0} fixé par le producteur en fonction de son programme fixé par les échanges sur les marchés ou en gré à gré.

Il s'agit d'un réglage en puissance (effort instantané), et ce réglage est de type proportionnel, c'est-à-dire que :

$$\Delta P_i = -K_i.\Delta F \quad \text{avec} \quad \Delta P_{i\,min} < \Delta P_i < \Delta P_{i\,max} \quad (2)$$

En cas de baisse de la fréquence ($\Delta F < 0$), le groupe doit pouvoir augmenter sa production, et inversement en cas de baisse. Ce type d'action obéit à des caractéristiques techniques fixées par l'ensemble des gestionnaires de réseau de la zone ENTSOe dont les principales sont : (i) la réserve mise à disposition par une unité doit être symétrique, $\Delta P_{i\,min} = -\Delta P_{i\,max}$, (ii) l'activation doit satisfaire une contrainte de rapidité, à savoir 15 secondes pour libérer la moitié de la réserve, et 30 secondes pour la totalité, et (iii) l'entité doit pouvoir maintenir l'effort maximal jusqu'à 15 minutes en cas de situation critique. Désormais, des unités de consommation (par exemple des électrolyseurs) peuvent aussi participer à ce réglage. Il leur faudra donc consommer moins si la fréquence est trop basse, et l'inverse si la fréquence est trop haute.

Enfin, il faut noter que, sur un horizon de temps suffisamment long, l'écart moyen ΔF est quasi nul, ce qui veut dire que le coût énergétique est quasi nul.

La participation d'une batterie

Si des actifs de consommation peuvent participer à ce réglage primaire de fréquence, il en est de même pour des batteries stationnaires. Ce type d'actif présente deux particularités : un réservoir d'énergie limité, et une capacité à délivrer ou à absorber de la puissance très rapidement (temps de réaction inférieur à 1 seconde). Cette très forte réactivité est un avantage dans le contexte de systèmes électriques qui sont amenés à disposer de moins d'inertie naturelle : l'augmentation de sources de production connectées par des convertisseurs électroniques de puissance et la diminution de celles basées sur des machines tournantes réduisent l'inertie du système (le terme J dans l'équation (1)), ce qui peut générer une plus forte instabilité de la fréquence. Pour contrebalancer cet effet, il est possible (i) d'appliquer des lois de commande spécifiques sur les convertisseurs électroniques pour apporter de l'inertie virtuelle, ou (ii) disposer de réserve de puissance avec des temps de réaction très courts pour réagir plus vite. Sur ce dernier point les batteries ont un rôle à jouer.

L'observation de la figure 1 montre que ; la fréquence est tantôt au-delà de 50 Hz ($\Delta F > 0$), et tantôt en deçà ($\Delta F < 0$). Ainsi une batterie qui participerait au réglage primaire devrait par exemple se charger si $\Delta F > 0$, puis se décharger si $\Delta F < 0$. Si ces efforts sont en apparence à énergie nulle, ce n'est pas le cas pour la batterie car les rendements de transformation (le convertisseur électronique de connexion au réseau et les réactions électrochimiques) ne sont pas de 100 %. Avec le temps, ces pertes vont puiser l'énergie de la batterie. Celle-ci étant à réservoir d'énergie limité, une attention spéciale a été apportée par RTE dans la rédaction de la réglementation technique applicable aux batteries [4] avec la définition de réserves d'énergie visant à

3 CRE, https://www.cre.fr/Electricite/Reseaux-d-electricite/services-systeme-et-mecanisme-d-ajustement

4 RTE, Règles de services système fréquence (septembre 2021), et annexe 15 « aptitude au réglage primaire de fréquence Agrégats ou Stockage seul »

être capable de maintenir l'effort maximal (en charge et en décharge) pendant 15 minutes en cas d'état d'alerte ou d'urgence.

La participation de ressources distribuées

La décarbonation du mix électrique avec une plus forte participation des énergies renouvelables intermittentes (qu'elles soient distribuées ou centralisées) apporte plus de contraintes au système électrique. Pour optimiser les coûts (capex et opex), il s'agit d'exploiter le système au plus proche de ses limites physiques. Cela veut dire exploiter toutes les flexibilités du système : celles de la production, celles de la consommation et celles des équipements de réseau. Une part de ces flexibilités existantes ou nouvelles sont par nature très distribuées (les ballons d'eau chaude, les véhicules électriques, des sites industriels,…). Leur exploitation et valorisation dans le cadre de marchés ou appels d'offre nécessite de les agréger pour atteindre une taille suffisante pour faire des offres sur ces mécanismes de valorisation. Cela amène à se questionner sur la structure des marchés et leur adaptation pour permettre la valorisation de ces nouvelles ressources [5]. Par exemple le marché de la réserve primaire de fréquence impose des offres avec une puissance minimale de 1 MW puis des paliers de 1 MW (un acteur ne peut valoriser que des MW entiers). Avec des batteries, et selon la taille des batteries considérées (stationnaires ou non), cela impose de réaliser une agrégation.

Petit historique du concept *vehicle-to-grid* (V2G)

Les premiers travaux de l'Université du Delaware (US)

L'idée d'utiliser les batteries des véhicules électriques pour contribuer à la stabilisation du réseau a été lancée par W. Kempton dans une publication [6] datée de 1997, puis une seconde [7] en 2005.

"La première étude partait d'un constat simple : les batteries embarquées dans les véhicules sont souvent stationnaires puisque les véhicules sont stationnés près de 95 % du temps. Dès lors, ne serait-il pas possible de les solliciter pour contribuer à l'équilibre du système électrique ?"

La première étude partait d'un constat simple : les batteries embarquées dans les véhicules sont souvent stationnaires puisque les véhicules sont stationnés près de 95 % du temps. Dès lors, ne serait-il pas possible de les solliciter pour contribuer à l'équilibre du système électrique ? Certes, l'incertitude sur la disponibilité d'un véhicule existe, mais en faisant une analyse statistique à l'échelle d'une flotte (plusieurs milliers de véhicules), la prévisibilité est très bonne, ce qui peut donner une meilleure disponibilité que certaines centrales électriques. Une comparaison est aussi faite en termes de puissance électrique qui pourrait être disponible. Par exemple, appliqué au cas français, une flotte de dix millions de véhicules qui injecterait une puissance de 3 kW (valeur limitée par une simple borne monophasée 16 A) donne un potentiel de 30 GW (environ 1/3 de la puissance à la pointe d'hiver). Le concept proposé était aussi mis en regard avec la tendance qui s'amorçait, à savoir le développement attendu de la production distribuée avec des réseaux de distribution plus actifs, afin de réduire les investissements sur le réseau de transport (assez fragile aux Etats-Unis). Ces batteries embarquées pourraient aussi apporter des capacités de stockage pour le système électrique, en plus des installations hydro-électriques. Une première estimation de la valeur de ce stockage était proposée, même si cela reste très dépendant des réglementations et caractéristiques des systèmes électriques.

La seconde étude propose d'évaluer la valeur qui pourrait être captée en fournissant des services au système électrique. D'abord il est rappelé qu'une flotte de véhicules a des caractéristiques différentes des centrales électriques : pour les véhicules, une puissance disponible importante, mais une durée d'utilisation faible, et un coût de capex par kW plus faible. Mais les centrales électriques ont des durées de vie beaucoup plus importantes. Par ailleurs, il est important de concilier les deux parties prenantes : l'utilisateur du véhicule dont la mission première est la mobilité (avoir suffisamment d'énergie), et l'opérateur du réseau (attend une disponibilité des capacités de production). Pour ce dernier, ce qui compte c'est la disponibilité à l'échelle de la flotte, pas d'un véhicule spécifique. Une gestion intelligente de la flotte doit donc permettre de satisfaire les deux parties.

Très rapidement, l'équipe de W. Kempton a lancé une expérimentation [8] autour d'un service V2G pour le système électrique. Compte-tenu de la rapidité de réponse pour échanger de la puissance et du peu d'énergie embarquée (section 1.3), la régulation de fréquence est rapidement apparue

5 C. Eid, P. Codani, Y. Perez, J. Reneses, R. Hakvoort, (2016) "Managing electric flexibility from Distributed Energy Resources: A review of incentives for market design", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 64, pp. 237–247

6 W. Kempton, S. Letendre, (1997) "Electric vehicles as a new power source for the electric utilities", Transportation Research Part D, vol. 2, no.3, pp. 157-175

7 W. Kempton, J. Tomic, (2005) "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy", Journal of Power Sources, vol. 144, pp280-294

8 A. Brooks, "Vehicle-to-Grid Demonstration Project: Grid Regulation Ancillary Service with a Battery Electric Vehicle", final report, Dec. 2002

comme un service bien adapté. Les variations de fréquence étant de faible amplitude et alternativement positive ou négative, les échanges ne mettent en jeu que de faibles énergies. Un véhicule test a été conçu avec un convertisseur de puissance bidirectionnel et avec un pilotage à distance pour donner les consignes de puissance en fonction de l'évolution de la fréquence. Une fonction « agrégateur » a été développée pour transmettre au véhicule – avec une période de 4 secondes – la consigne de puissance. L'expérimentation a permis de voir que la réponse du véhicule répondait aux réglementations du gestionnaire de réseau. L'analyse du vieillissement de la batterie ne faisait pas partie du cadre de l'étude, mais une mesure a permis de voir que la capacité de la batterie était améliorée sans doute car la batterie restait active avec des cycles de faibles profondeurs.

Les premiers travaux en France

Parmi les premiers travaux, il y a eu ceux menés par Supélec en partenariat avec l'entreprise PSA (aujourd'hui Stellantis) dans le cadre de la chaire Armand Peugeot. Ces travaux [9] se sont attachés à évaluer (i) la valeur qui pourrait être captée par des flottes de véhicules électriques (VE) qui participeraient au réglage primaire de fréquence en France, et (ii) en quoi le cadre réglementaire pouvait constituer une barrière à cette participation. La valorisation avait été estimée dans un contexte réglementé (avant 2017) puis dans celui d'une place de marché européenne (*FCR cooperation*). Ces travaux académiques ont aussi permis à PSA de participer au projet Parker avec l'université DTU (Danemark) où deux véhicules avaient été préparés pour tester une participation au réglage de fréquence avec un système unidirectionnel et bidirectionnel.

L'augmentation des travaux académiques sur ce sujet a conduit la Commission de régulation de l'énergie (CRE) à s'y intéresser car les défis tant technologiques que réglementaires restent nombreux. Dans son rapport [10], la CRE mentionne 22 recommandations dont 4 concernaient la déclaration et l'installation de bornes de recharge bidirectionnelle qui deviennent ponctuellement des sources. De manière similaire, RTE intègre dans son étude [11] sur le développement de l'électromobilité la possibilité de fonctionner en mode bidirectionnel (V2G), par exemple au travers d'un scénario de flexibilité renforcée avec 80 % de recharge piloté dont 20 % en mode V2G. Aujourd'hui la possibilité d'utiliser les véhicules en mode bidirectionnel pour du soutien au réseau électrique (V2G) ou au bâtiment (V2B ou V2H, *vehicle-to-building* ou *vehicle-to-home*) est considérée comme une option possible même si elle ne sera pas forcément implémentée sur tous les véhicules.

Vers la construction d'une offre commerciale

Aux Etats-Unis, les travaux de l'équipe de W. Kempton ont conduit à la création en 2010 de la start-up Nuvve dont l'objet est de déployer des solutions technologiques capables d'offrir des services V2G. Pendant plus de dix ans, des projets démonstrateurs ont été initiés sur les cinq continents. En 2019, Nuvve et EDF se sont associées pour créer DREEV qui a vocation à concevoir, développer et commercialiser des solutions de charge (V1G) et charge/décharge (V2G) intelligentes pour véhicules électriques sur cinq pays en Europe [12]. DREEV est spécialisé dans l'agrégation de flexibilités et offre ses services à des agrégateurs « *multi-assets* » tel que AGREGIO, filiale d'EDF. La solution V2G de DREEV est basée sur le standard CHAdeMO de NISSAN [13] ; elle repose sur trois composants principaux :

1. un chargeur DC bidirectionnel développé par ABB en collaboration avec DREEV,

2. une plateforme d'agrégation des VE qui contrôle la charge et la décharge des batteries en temps réel,

3. une application logicielle dédiée embarquée dans le chargeur V2G pour assurer les performances du service FCR, et pour anticiper le « *stacking* » du service FCR avec des services complémentaires.

La section suivante apporte quelques précisions pour mieux comprendre le défi technique qui a été relevé jusqu'à la certification par RTE et les perspectives prometteuses qu'il ouvre.

De la conception d'une solution industrielle à sa mise en œuvre

La conception d'une borne de charge bidirectionnelle

Pour des questions de coûts, les chargeurs (embarqués ou non) sont usuellement conçus pour un transit de puissance unidirectionnel. La conception d'un chargeur bidirectionnel est donc une étape clé. Le choix a été fait de concevoir un chargeur DC (le convertisseur est donc embarqué dans la borne) pour ne pas être dépendant du chargeur

I Figure 2 : Chargeur bidirectionnel DC (standard CHAdeMO).

9 Thèses de doctorat de Paul Codani (2016) puis Olivier Borne (2019)

10 CRE, « Les réseaux électriques au service des véhicules électriques », document de réflexion et de proposition, octobre 2018

11 RTE, « Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique », mai 2019

12 France, UK, Belgique, Italie, Allemagne

13 Seul standard de communication borne – VE compatible du V2G à date. La solution DREEV a été conçue pour être facilement évolutive et sera adaptée aux différents protocoles V2G-compatible (comme le CCS à horizon 2023-2024).

AC/DC embarqué dans les véhicules à leur production. Malgré tout, le véhicule a besoin d'être compatible, c'est-à-dire que le protocole de charge DC implémenté par le véhicule doit être CHAdeMO, seul protocole de charge compatible des services V2G à date.

Le chargeur qui a été conçu par ABB (figure 2) respecte le cahier des charges défini par DREEV, à savoir :

- être un produit industrialisable, pour cela il a été testé pendant plus d'un an dans les laboratoires d'EDF R&D ;

- fournir une puissance de 11 kW en charge et décharge, pour une large gamme de température ambiante ;

- respecter les différents *grid code* en Europe (c'est-à-dire les règles de raccordement au réseau) ;

- une couche hardware et software sécurisées en particulier en termes de cybersécurité pour des systèmes critiques ;

- une interface utilisateur simple ;

- un usage possible dans tout type d'environnement extérieur (protection IP65), et sans besoin de maintenance ;

- une interopérabilité avec les véhicules bidirectionnels de standard CHAdeMO et avec la plateforme OCPP 1.6-J de DREEV.

Ce chargeur présente également toutes les caractéristiques techniques *hardware* et *software* pour assurer un service FCR selon les exigences des gestionnaires de réseau de transport (GRT) européens, à savoir :

- une mesure de fréquence précise et très régulière, une mesure et un contrôle de la puissance précis ;

- une réponse rapide aux déviations de fréquence (réaction en moins de 500 ms et une libération de la puissance maximale en moins de 2 secondes), cette caractéristique étant essentielle pour les futurs systèmes électriques à faible inertie ;

- une compatibilité pour embarquer l'application DREEV.

Une plateforme d'agrégation et pilotage

La plateforme *cloud* (figure 3) a été conçue pour être évolutive :

- elle est basée sur une architecture micro-services modulaires, événementiels et « *stateless* » ;

- elle dispose d'un très haut taux de disponibilité, la redondance étant complétée par des solutions de déploiement sans arrêt de service (« *zero-downtime deployments* ») ;

- elle est « scalable », s'appuie sur le déploiement de conteneurs (« *container deployment* ») avec des capacités d'adaptations automatiques (« *auto-scaling capability* ») ;

- la sécurité de la plateforme est garantie par la mise en place de processus et d'outils à l'état de l'art selon les meilleures pratiques en place dans l'industrie ;

- elle a été conçue et développée dans un environnement professionnel avec une forte culture DevOps, en utilisant les process de « *Infrastructure-as-Code* » pour permettre une observabilité et des livraisons continues.

La plate-forme maintient à tout moment une vision actualisée de l'état du système, en gérant tous les événements pouvant survenir en temps réel :

- connexion et déconnexion des véhicules ;

- changement dans les besoins de mobilité planifiés (énergie minimale requise) ;

- demandes par les utilisateurs de charge immédiate ;

- perte de communication entre les bornes et la plateforme ;

- incidents divers pouvant affecter la disponibilité des chargeurs et véhicules ;

- …

Grâce à la plateforme et à l'application mobile DREEV, les utilisateurs connaissent l'état de charge de leurs véhicules et

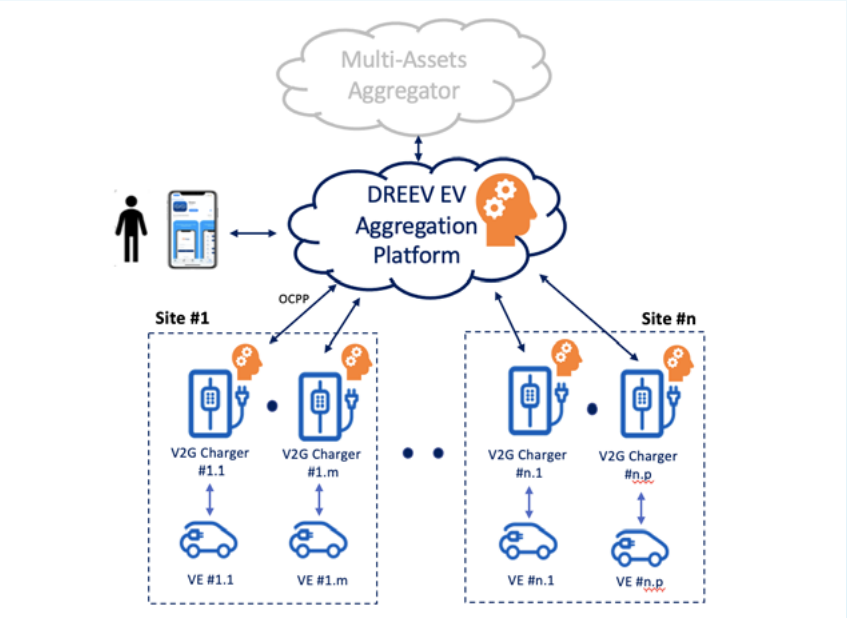


Figure 3 : Plateforme *cloud* d'optimisation.

peuvent modifier leurs besoins de mobilité en temps réel. Cette plateforme intègre un module d'optimisation qui définit en temps réel les véhicules à charger/décharger en fonction de l'état actuel du système électrique et de ses évolutions prévues. L'optimisation se fait avec une fonction multi-objectifs :

- respecter les besoins de mobilité de chaque utilisateur ;

- minimiser la facture électrique du client et les émissions de CO_2 (recharge du véhicule quand les prix et/ou l'intensité carbone sont faibles, et décharger quand ils sont élevés) ;

- fournir des services au système électrique (réserve FCR) par agrégation des VE.

L'optimisation doit également satisfaire les contraintes suivantes :

- le respect des puissances minimale/maximale du chargeur et/ou du véhicule en fonction de l'état de charge du véhicule ;

- la minimisation des pertes de conversion (AC/DC et DC/AC) ;

- le respect de la puissance maximale admissible par phase et au sein de chaque installation (nécessaire en cas d'installation de plusieurs chargeurs au sein d'un même site) ;

- le respect de la puissance souscrite de chaque site ;

- le respect de la réglementation des GRT sur la gestion du stock d'énergie en cas d'état d'alerte ou d'urgence ;

- la prise en compte des exigences techniques pour préserver la durée de vie des batteries.

Ainsi, plusieurs contraintes couplées sont prises en compte par le module d'optimisation :

" Grâce à la plateforme et à l'application mobile DREEV, les utilisateurs connaissent l'état de charge de leurs véhicules et peuvent modifier leurs besoins de mobilité en temps réel. "

• au niveau de chaque site (par exemple respect des contraintes locales) ;

• au niveau de la flotte entière (par exemple fourniture de la puissance FCR cohérente avec les offres acceptées sur le marché).

Ce module d'optimisation est au cœur de la solution développée, et bénéficie de la grande expérience du département d'optimisation d'EDF R&D.

L'application DREEV embarquée

L'application DREEV embarquée dans le chargeur dispose de caractéristiques fondamentales pour fournir un service FCR selon les exigences techniques des GRT :

- elle met en œuvre un algorithme de régulation rapide qui, en s'appuyant sur des courbes puissance-fréquence régulièrement communiquées par la plate-forme d'agrégation pour chaque chargeur, contrôle en temps réel l'électronique de puissance du chargeur et fournit une réponse de puissance rapide aux écarts de fréquence du réseau ;

- elle permet de garantir une continuité de service, même dans des situations de déconnexion du chargeur à la plateforme.

L'architecture hybride de la solution DREEV, combinant une plateforme *cloud* et une application embarquée, garantit la performance et l'évolutivité de la solution. Ainsi, la possibilité de faire évoluer la solution pour adresser des services réseaux complémentaires (aFRR, effacement, etc.) est facilitée.

L'interface entre l'application embarquée DREEV et le logiciel du fabricant du chargeur a été définie et documentée ; l'application DREEV peut donc facilement être embarquée dans d'autres chargeurs V2G que celui produit par ABB.

Une solution conforme aux exigences FCR

La solution DREEV a été conçue pour garantir les niveaux de performances requis pour fournir le service de FCR :

• elle réagit très vite aux écarts de fréquence du réseau, et est prête à faire face aux évolutions prévisibles des systèmes électriques (diminution de leur inertie synthétique due à l'intégration massive des énergies renouvelables) ;

• elle est résiliente aux différents événements pouvant survenir en cours d'exploitation comme les départs de véhicules, les pertes de communication, les demandes de charge instantanée des utilisateurs, les incidents sur l'alimentation électrique des chargeurs, etc. ;

• de par sa nature distribuée (les bornes V2G sont réparties sur de nombreux sites), elle fournit une réserve de puissance FCR agrégée très fiable (bien supérieure aux autres actifs en termes de fiabilité).

Un cadre régulatoire à adapter

Le raccordement d'un dispositif au réseau électrique requiert une compatibilité avec la réglementation en vigueur. Entre autres, celle imposée par les normes pour tout ce qui touche à la sécurité du

public. Une borne bidirectionnelle est un nouvel objet qui est à la fois un élément de consommation et de production. Il faut donc satisfaire la réglementation afférente aux sources (comme pour une installation solaire personnelle). Un des points mentionnés par le CRE concerne la protection de découplage en cas d'isolement du réseau suite à un défaut sur le réseau. Le véhicule doit alors se déconnecter pour ne pas engendrer un risque électrique humain.

Un autre volet du cadre régulatoire est celui qui peut faciliter (ou pas) les démarches administratives pour raccorder une borne bidirectionnelle. De même il y a toute la réglementation qui peut faciliter ou bloquer l'accès de ces nouvelles ressources aux mécanismes de valorisation. Les enjeux peuvent concerner l'adaptation des designs de marchés et/ou les caractéristiques techniques à satisfaire.

Le passage par la certification

La certification est une étape importante car RTE a besoin de disposer de réserves fiables afin de garantir la sûreté du système électrique. RTE évalue la capacité d'une *entité de réserve* (EDR) à satisfaire aux exigences techniques du service FCR à travers les 3 étapes suivantes qui constituent le processus de certification :

- une description fine de la solution implémentée, et en particulier des éléments qui démontrent la conformité de la solution aux exigences RTE ;

- la réalisation de scénarios de simulations qui permettent notamment de mettre en évidence le comportement de l'EDR lors d'évènements réseaux exceptionnels (par exemple entrée en état d'alerte ou en état d'urgence) ;

- La réalisation de tests réels avec l'ensemble des éléments qui constituent l'EDR, pour la puissance de réglage pour laquelle l'EDR se fait certifier. Cette étape repose sur l'injection d'un signal de fréquence fictif en entrée de l'EDR pour suivre le process de test défini par RTE. Ce process permet à RTE de vérifier les caractéristiques techniques du réglage FCR de l'EDR, notamment en termes de temps de réponse et de précision du contrôle de puissance.

Concernant l'EDR V2G, la complexité de mise en œuvre des tests de certification réside dans le caractère distribué de l'EDR (les véhicules et les bornes V2G sont réparties sur un grand nombre de sites).

I Figure 4 : Evolution de la puissance échangée lors d'une séquence de variation de fréquence.

Exemple de mise en œuvre

La certification a ainsi été obtenue en décembre 2021 après plusieurs années d'efforts méthodiques pour développer une solution de bout en bout qui respecte toutes les exigences

Les auteurs

Paul Codani est titulaire d'un diplôme d'ingénieur de l'École Supérieure d'Electricité (CentraleSupelec) et d'un doctorat en génie électrique de l'Université Paris-Saclay sur l'intégration des véhicules électriques dans les réseaux. Paul a travaillé entre 2013 et 2018 pour le Groupe PSA en tant que chef de projet *smart grids*, contribuant à la prédisposition des futurs véhicules électriques PSA d'un point de vue technique (spécifications et validation incluant la normalisation) et travaillant sur les services associés à destination des clients du groupe. Il rejoint DREEV en 2019, en tant que responsable des projets de recharge intelligente en France. Il a contribué depuis 2014 à de nombreuses publications scientifiques dans des revues et conférences internationales.

Marc Petit est Professeur des universités à CentraleSupélec et membre émérite de la SEE. Il mène ses travaux de recherche sur les smart grids au sein du laboratoire GeePs où il est responsable de l'équipe « réseaux électriques ». Depuis 2012, il est co-titulaire de la chaire Armand Peugeot sur l'électromobilité avec des travaux sur l'intégration des véhicules électriques dans les *smart grids*.

Figure 5 : Véhicule d'une flotte pouvant participer au réglage de la fréquence.

"Une centaine de bornes V2G ont été déployées en France, majoritairement chez des clients professionnels qui utilisent les bornes V2G pour recharger les véhicules électriques de leur flotte d'entreprise."

dont les plus contraignantes qui visent à préparer une intégration massive des énergies renouvelables, par exemple un temps de réaction de l'EDR inférieur à 500 ms.

Une centaine de bornes V2G ont été déployées en France, majoritairement chez des clients professionnels qui utilisent les bornes V2G pour recharger les véhicules électriques de leur flotte d'entreprise. Ainsi, les véhicules électriques sont principalement utilisés pendant la journée, et restent branchés aux bornes V2G la nuit en semaine et toute la journée le week-end. Cela donne une disponibilité avec une bonne prévisibilité.

Une offre commerciale à destination des clients professionnels a été conçue et lancée sur le marché français. Elle est portée par Izivia (opérateur de point de charge du groupe EDF) [14]. Il s'agit de la première offre commerciale qui s'appuie sur la technologie V2G en Europe.

Les figures 4 et 5 illustrent la mise en œuvre de la solution V2G DREEV sur le terrain. La figure 4 présente une capture d'écran de l'outil de supervision de DREEV. La courbe orange représente les variations de puissance de la flotte V2G (somme des puissances individuelles de toutes les bornes V2G) pendant quelques heures. La courbe verte présente les variations de la fréquence du réseau électrique sur la même période. La figure 5 montre une installation chez un client de l'offre *V2G Entreprise*. Les véhicules électriques sont des Nissan eNV200 ; ils sont utilisés par un service municipal pour réaliser des interventions de natures diverses.

14 Les détails de l'offre V2G Entreprise sont disponibles sur le site Izivia : https://www.izivia.com/bornes-electriques-lieu-de-travail/bornes-de-recharge-V2G-entreprise

Conclusion : les prochaines étapes

La certification RTE obtenue par DREEV pour son EDR V2G est une étape majeure sur la voie de l'industrialisation du V2G. Étant donné que le service FCR est l'un des services les plus contraignants d'un point de vue technique, cette réalisation démontre clairement le potentiel des véhicules V2G, associés à une plate-forme d'agrégation en temps réel et à des chargeurs bidirectionnels adaptés avec une intelligence intégrée, pour fournir des services de grande valeur aux systèmes électriques.

Sur ces solides fondations, DREEV a commencé à « *stacker* » plusieurs nouveaux services avec le service FCR (tels que l'aFRR, des services d'effacement, d'arbitrage d'énergie, etc.) afin de maximiser la valeur du V2G pour le système électrique tout en fournissant ses services à valeur ajoutée aux clients.

DREEV prévoit de construire dans les années à venir la plus grande centrale électrique virtuelle V2G d'Europe. Cette centrale virtuelle sera constituée d'une agrégation de 800 véhicules électriques V2G, au standard CHAdeMO dans un premier temps puis CCS.

Le V2G se situe à l'intersection de deux industries historiquement indépendantes : l'automobile et l'énergie. Sur la base du retour d'expérience collecté lors du processus de certification de l'EDR V2G DREEV, il semble évident qu'une collaboration étroite entre les acteurs de la chaîne de valeur - constructeurs automobiles, fabricants de chargeurs, énergéticiens - sera nécessaire pour accélérer le développement de la technologie et aider à faire face à l'urgence climatique en décarbonant les systèmes électriques, en Europe et dans le monde. ■

SEE, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication

Ingénieurs, chercheurs ou universitaires, impliqués dans les domaines rapidement évolutifs de l'énergie, des télécommunications ou des TIC, vous éprouvez un besoin de rencontre, de partage et de maintien des connaissances. Ouverte à tous, la SEE offre un cadre adapté pour cela.

Rejoignez-nous !

Avec ses **Comités techniques** et ses **Groupes régionaux**, les **congrès**, les **journées d'étude** et **conférences** qu'elle organise, la SEE offre des lieux de convergence où vous échangerez avec vos pairs, participerez à des manifestations scientifiques ou les organiserez. Sa **Revue de l'électricité et de l'électronique** (la REE) vous donnera une vision de synthèse sur des sujets variés et vous ouvrira ses colonnes.

Vos travaux pourront être reconnus par **des distinctions et des prix prestigieux**. Pour votre entreprise, c'est l'opportunité de traiter un ensemble de problématiques actuelles, souvent sensibles. Pour vous étudiants et votre université ou grandes écoles, la SEE offre une ouverture unique vers le monde de l'industrie.

Adhérez dès à présent

Les actions de la SEE :

› Fédérer la communauté scientifique et technique pour promouvoir la recherche, l'université, l'industrie et les sciences au profit d'un bien-être accessible à tous et durable.

Véritable **organe d'information professionnelle** à destination des Ingénieurs et Scientifiques, elle rend compte des technologies développées tant en France q u'à l'international.

Elle est le support d'un savoir-faire porté par des **publications à caractère scientifique et technique de haut niveau** (monographies, proceedings, REE, 3EI, fascicules et autres outils d'information).

La SEE est également propriétaire de **la Maison d'Ampère**, qui abrite le musée de l'électricité consacré à la Vie d'André-Marie Ampère et à l'évolution de l'électricité.

› Organiser des événements scientifiques ou professionnels

Seule ou en partenariat avec des organismes nationaux ou internationaux, la SEE suscite de nombreux échanges scientifiques et techniques en organisant de nombreuses manifestations (colloques, congrès, journées d'étude, soirées débats, formations, etc.) pour se rassembler et partager entre spécialistes autour des savoirs scientifiques, sur des thématiques qui ne cessent d'évoluer.

› « Ampère 200 ans »

Depuis 2020, la SEE, avec la SAAMA,rassemble les communautés scientifiques, industrielles et de l'éducation pour le 200ème anniversaire de la naissance de l'Électrodynamique dont André-Marie Ampère est à l'origine et qui ont apporté à tous progrès et confort matériel.

La SEE poursuit cette démarche pour susciter des vocations auprès des jeunes avec l'appui des professionnels et des enseignants pour :

- **Montrer l'importance prise par l'électricité** dans le monde moderne, sur les avancées que celle-ci permet d'obtenir dans la vie industrielle et la vie de tous les jours,
- **Présenter les enjeux pour le futur** avec les implications pour notre société et la **formation des jeunes** pour susciter des vocations vers des **métiers d'avenir**.

Le site Ampère 200 ans