



© Have a nice day Photo / Shutterstock

Des solutions innovantes pour la mobilité électrique

Introduction

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.

Jean-Claude Vannier

Chef de département, CentraleSupélec

Marc Petit

Professeur des Universités
CentraleSupélec

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 sec-

teur 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.”

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’aéro-

nautique (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’efficacité ●●●

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.

“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’efficacité, 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 mo-

dulaire 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.93
Intégration et modularité des chaînes de conversion électromécaniques	p.100
Mise en œuvre industrielle du concept vehicle-to-grid (V2G) pour une participation au réglage de la fréquence du système électrique	p.105