

## Introduction

La traction électrique s'est véritablement ancrée dans la vie quotidienne dès la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle par l'intermédiaire des métros, trains ou tramways. L'électrification de la société prend forme à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et avec elle, un nouveau système énergétique se met en place et s'articule autour de la production, du transport et de la distribution de l'électricité. Les transports en commun ne tardent pas à adopter un tel procédé pour leur fonctionnement : le lieu de production de l'énergie électrique est indépendant de celui de son utilisation. Le stockage embarqué de l'électricité prend seulement un rôle secondaire. Au fil des décennies, ce type de transport en commun s'est révélé à la hauteur des attentes et s'est rapidement imposé au sein de la société.

Mais qu'en est-il des véhicules de transport personnel ? Le cadre technique paraît bien différent. Dans ce cas de « véhicule sans fil », le problème du stockage de l'électricité constitue l'un des principaux enjeux. L'utilisation de batteries d'accumulateurs, technologie actuellement privilégiée par les constructeurs, induit des limites techniques intrinsèques et semble nécessiter une optimisation permanente.

Les voitures électriques sont longtemps restées absentes du paysage automobile, vraisemblablement jugées trop peu performantes en comparaison à leurs équivalents thermiques. Les dispositifs de stockage d'électricité, électrochimiques notamment, ont souvent été pointés du doigt, symboles d'une autonomie limitée et condamnée à le rester. Cependant, depuis quelques années, une filière électrique du secteur automobile semble émerger : il n'est plus rare de croiser un modèle 100 % électrique, que l'on peut notamment distinguer par le silence de son moteur. Les bornes de recharges se multiplient. Des services de voitures électriques en libre-service, tel Autolib' à Paris, sont une réalité et sensibilisent le public à un tel usage. Ce que l'on pouvait considérer, il y a encore 10 ans, comme une attraction curieuse pourrait constituer le proche avenir de l'automobile.

Comment expliquer ce revirement apparent ?

La voiture électrique est souvent considérée comme une innovation contemporaine. Cantonnée à un statut d'objet d'avenir, il devrait nécessairement s'agir d'une technologie récente. En réalité, nous sommes déjà bien éloignés de la première tentative de développement d'une filière électrique au sein du secteur automobile.

Au salon des Tuileries de 1899, les modèles exposés par l'*Automobile Club de France* sont pour certains équipés de moteurs à vapeur (très peu), pour d'autres de moteurs thermiques (en majorité), pour d'autres enfin, de moteurs électriques. Le pétrole, l'électricité et la vapeur se disputent depuis quelques années le lucratif honneur de fournir aux automobilistes leur moyen favori de transport. Durant cette phase d'émergence, les voitures électriques, dont les premiers modèles sont apparus à peu près à la même période que ceux à essence, occupent une place non négligeable sur le marché. Beaucoup d'arguments semblent en faveur de la traction électrique. Cependant, c'est la voiture à pétrole qui va triompher et contrarier le mariage des deux innovations majeures de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle : l'électricité et l'automobile.

Depuis le choc pétrolier de 1973, on assiste timidement, puis beaucoup plus sérieusement depuis maintenant moins de 10 ans, à un regain d'intérêt pour le véhicule électrique tant utilitaire que particulier. Le discours sur l'environnement, le renchérissement périodique qui accompagne la disparition potentielle des produits pétroliers et l'évolution de la technologie redonnent un véritable intérêt au véhicule électrique. Bien plus, on voit bien que la pollution actuelle, sonore et chimique, dans les grandes villes, est devenue préoccupante (Paris) ou intolérable (Beijing).

Sommes-nous vraiment devant le « grand retour » de l'électrique ? Après plusieurs échecs observés depuis 120 ans, la voiture électrique est peut-être finalement en train de réussir à s'imposer.

On interroge cette possibilité en racontant l'histoire des constituants existants ou potentiels qui prennent part au cycle énergétique inhérent à un véhicule électrique, de l'alimentation en électricité *in situ* à sa conversion en énergie mécanique. Au lieu de se focaliser sur la seule histoire de la voiture électrique en tant qu'objet unitaire, il nous paraît nécessaire d'effectuer une telle décomposition. C'est bien le développement de ses constituants qui permet à l'électromobile d'être initialement envisagée et qui ne cesse d'influer sur son évolution. L'objectif est de penser la voiture électrique à travers l'évolution des composants qui la caractérisent, qui la distinguent du mode de traction thermique. Il s'agit de retracer les innovations successives, depuis leurs inventions jusqu'aux améliorations récentes :

– d’une part, les dispositifs techniques susceptibles de servir de sources d’énergie électrique au sein des véhicules : batteries, piles à combustible, supercondensateurs, générateurs thermoélectriques à radio-isotopes. Le stockage de l’électricité constitue, encore aujourd’hui, le principal enjeu technique associé au développement du marché de l’électromobile. Différentes technologies existent de nos jours et présentent des propriétés bien distinctes. Quelles ont été leurs influences sur l’évolution du secteur électromobile jusqu’à aujourd’hui ? Une meilleure appréciation des caractéristiques de chacun de ces dispositifs et de leurs limites respectives nous éclairera sur les causes qui poussent actuellement la majorité des constructeurs vers le choix d’une technologie spécifique et sur les perspectives d’avenir éventuelles ;

– d’autre part, les moteurs électriques et les systèmes électroniques. Par un rendement de conversion énergétique élevé (environ 80 % contre 30 % pour un moteur thermique) et une pollution sonore et atmosphérique faible, le moteur électrique présente des caractéristiques particulièrement attrayantes pour de telles applications. De quelle manière son développement, nécessairement lié à celui des génératrices électromagnétiques, a pris forme et s’est imposé comme l’un des principaux avantages de la voiture électrique ?

L’aspect technique n’est pas le seul à prendre en compte pour comprendre la situation dans sa globalité, l’évolution des paysages socio-économiques et l’incidence des nouvelles approches système et filière industriels retiendront également notre attention.

Voici un bref aperçu des 6 chapitres de cet ouvrage.

### *Chapitre 1 : de la pile d’Alessandro Volta aux batteries au Lithium*

La première pile (Volta) date de 1800 mais il faudra attendre 1880 pour disposer d’une batterie opérationnelle (Planté). Le point préoccupant a toujours été celui des performances en termes de durée de vie, d’énergie disponible par rapport au poids de la batterie (densité d’énergie en Wh/kg), de temps de charge. On peut dire qu’au cours des 30 dernières années, ces performances se sont améliorées dans un rapport de 3 à 5. De nombreuses recherches se développent aujourd’hui pour faire émerger de nouvelles générations de batteries.

### *Chapitre 2 : de la Gas Voltaic Battery de William Grove aux piles à combustible*

Le premier prototype date de 1840, mais il faut attendre un siècle (1940) pour voir apparaître une pile à combustible utilisable dans les applications spatiales de 1960. Les recherches se sont grandement développées depuis 1990 mais il reste encore beaucoup à faire notamment pour la production et la distribution des combustibles utilisés par ces piles.

### *Chapitre 3 : de la bouteille de Leyde aux supercondensateurs*

Le principe des supercondensateurs date de 1880, mais l'industrialisation s'est seulement effectuée à partir des années 1980-1990. Aujourd'hui, les supercondensateurs sont utilisés dans la voiture thermique pour le dispositif dit *Stop and Start* et dans les voitures électriques pour répondre aux demandes de pics de puissance (démarrage et dépassements), donc en association avec des batteries. Ils se caractérisent par une recharge rapide.

### *Chapitre 4 : les générateurs thermoélectriques à radio-isotopes*

Un générateur thermoélectrique à radio-isotopes (RTG en anglais) est un dispositif qui convertit en électricité la chaleur dégagée par le phénomène de désintégration radioactive. Ces générateurs sont fréquemment implantés au sein des sondes spatiales et des satellites depuis le début des années 1960. Actuellement, le rover Curiosity est un véhicule qui se déplace sur la planète Mars grâce à un RTG utilisant le plutonium 238. Il n'aura pas besoin de recharger sa batterie pendant plusieurs décennies. On peut penser que l'utilisation sur terre de cette super batterie est une utopie : cependant, quelques innovateurs américains s'y intéressent grandement.

### *Chapitre 5 : de la roue de Barlow aux moteurs synchrones et asynchrones à très haut rendement*

On dit toujours que la première invention de moteur est la roue de Barlow (1820), mais il faut attendre 1870 pour voir apparaître une réelle innovation industrielle : la machine de Gramme à courant continu, qui est à la fois une génératrice et un moteur. La fin du XIX<sup>e</sup> siècle voit se développer les moteurs à courant alternatif synchrones puis asynchrones. Depuis 1960, les applications avancées du type TGV ou paquebots de croisières ont vu le jour grâce à l'avènement de nouveaux composants semi-conducteurs d'électronique de puissance. Les systèmes électroniques de contrôle commande actuels permettent les grandes performances des variateurs de vitesse et les programmes de simulation numérique ont permis la mise au point de nouveaux matériaux et nouvelles structures de moteurs et générateurs électriques.

### *Chapitre 6 : la voiture électrique, l'histoire d'un perpétuel objet d'avenir*

Nous revenons sur la victoire au début du XX<sup>e</sup> siècle de l'automobile à essence sur la voiture électrique. Il y eut cependant quelques *Electric Cabs* à Londres et à Paris des fiacres électriques, des taxis électriques, des voitures électriques de Poste, puis au cours du siècle, plusieurs voitures électriques ont émergé mais chaque fois avec des productions de quelques centaines d'unités, seulement. Aujourd'hui, fin 2016, la majorité des constructeurs de voitures thermiques ont mis sur le marché, avec plus

ou moins de réussite, des voitures électriques le plus souvent destinées prioritairement à la ville, mais plus seulement.

Avant d'aborder le cœur du sujet, il faut nécessairement dire quelques mots sur les étapes qui peuvent mener à de telles innovations de rupture. Au début, la découverte est le plus souvent individuelle, plus ou moins étayée par des équations, donc plus ou moins scientifique, fortuite ou issue d'une idée, d'un concept. Cette découverte peut ensuite se matérialiser en une invention qui revêt un caractère technique : c'est un produit ou un procédé présenté sous forme de prototype. Est-ce déjà une innovation industrielle ? L'idée initiale s'est bien transformée en méthode, produit et outil qui marchent, mais le résultat ne sera reconnu comme innovation non avortée qu'avec la réussite économique d'une application industrielle de l'invention.

Les temps entre la découverte, l'invention et l'innovation peuvent être très longs, plusieurs décennies voire des siècles. En effet, la technologie peut être difficile à développer, le marché inexistant ou insuffisant, des technologies alternatives peuvent exister ou être plus simples à développer, on peut aussi être confronté à une absence, à une insuffisance ou à des choix de financements.

De nos jours, on peut observer une forte accélération des processus d'innovation due à des capacités d'ingénieurs, de chercheurs, de collaborations recherche-industrie, de méthodes, d'investissements, jamais atteintes précédemment. Cependant, même dans le cas exemplaire et exceptionnel de la microélectronique galopante, plus de 30 ans se sont passées entre la découverte et l'invention du transistor en 1947, puis du microprocesseur en 1971 et la microinformatique standardisée d'IBM et Microsoft des années 1980. Aujourd'hui, seules les applications Internet peuvent se développer en quelques années.