

La voiture électrique : d'un objet technique à une innovation systémique et des usages de mobilité efficaces pour le climat

Soufiane Lamalam, Diane Petit de Bantel & Théophile Puech

Étudiants au Master PIC (promotion 2022-2023)

Cet article traite des enjeux autour du développement de la voiture électrique. C'est non seulement une redéfinition de l'objet voiture mais également une redéfinition de l'écosystème automobile et électrique. Avec l'arrivée des énergies renouvelables, qui pour beaucoup présentent le défaut de ne pas être pilotables, la voiture électrique peut également aider à réinventer le stockage de l'énergie. En effet, des technologies comme le V2G dessinent un futur dans lequel le véhicule électrique serait le tampon entre les pics de production et les pics de consommation, contribuant ainsi à pouvoir augmenter la proportion d'énergies renouvelables non pilotables (éolien, solaire, entre autres). De nombreuses innovations d'usages se dessinent aussi pour la voiture. Le VaaS propose de réimaginer notre manière de penser l'automobile, en rentabilisant l'investissement initial, carbone comme financier, dans le véhicule. Les possibilités additionnelles offertes par le véhicule électrique dans le moyen et long-terme sont plurielles et pluriformes.

De tous les sujets qui animent le débat public, une thématique en particulier occupe une part de plus en plus significative : celle du réchauffement climatique.

Les rapports des scientifiques se succèdent et exhortent le monde à réagir pour aborder une transition sans précédent vers des modèles d'organisation, économiques ou sociétaux durables, en adéquation avec une trajectoire d'émission bas carbone. Pour cela, les pays du monde se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre pour remplir un objectif d'augmentation de la température mondiale de 1,5°C d'ici 2050. Ce cap défini dans l'accord de Paris de la COP21 (Conférence des Nations unies sur les changements climatiques de 2021) semble encore loin d'être acquis avec une réalité des émissions de CO₂ bien loin des ambitions premières. Lors de l'ouverture de la COP27 à Charm el-Cheikh, le constat d'une augmentation des émissions de CO₂ était sans appel. Après une réduction en 2021 due à la pandémie, la consommation des énergies fossiles comme le pétrole, le gaz ou le charbon, tire les émissions de CO₂ à la hausse en 2022 (étude des scientifiques du Global Carbon Project). Les émissions de CO₂ d'origine fossile « devraient augmenter de 1% par rapport à 2021, pour atteindre 36,6 milliards de tonnes, soit un peu plus que les niveaux de 2019 avant le Covid-19 ».

La COP27 s'est déroulée dans un contexte géopolitique particulier sur fond de guerre en Ukraine et de compétition croissante entre les deux plus gros émetteurs mondiaux : les États-Unis et la Chine. Le président Biden a par ailleurs annoncé un plan, de près de 400 milliards de dollars, sur 10 ans baptisé l'Inflation Reduction Act (IRA) qui a éveillé des tensions avec ses alliés européens notamment. Cet élan protectionniste pour le climat implique de larges subventions favorisant l'industrie américaine stratégique, typiquement un bonus électrique de 7500\$ à l'achat d'un véhicule dont la batterie est produite aux États-Unis. Cette décision pourrait avoir un impact négatif sur la production automobile européenne d'autant que l'Union s'est fixée comme objectif d'interdire la vente de véhicules thermiques d'ici 2030 et d'opérer une transformation radicale vers l'électrique.

Avec l'IRA, les États-Unis viennent raviver une inquiétude sur le continent autour de la fragilité du projet du tout électrique. Les industries européennes ont dû se réinventer pour faire face à cette injonction politique qui veut faire de cette innovation technologique, un levier de la lutte contre le réchauffement climatique. Or, le chemin est long et sinueux avec des menaces sur la compétitivité que génèrent de nouveaux entrants chinois en avance de phase. Par ailleurs, la course à l'autonomie et la tradition automobile d'innover d'abord pour le haut de gamme induit des stratégies de développement de batteries de plus en plus capacitaires dont la fabrication rejette davantage de CO₂. Il se pose alors la question d'allier innovations technologiques et sobriété. Par exemple, la redéfinition fonctionnelle de la voiture peut aussi amener à une conception nouvelle de son usage en tant que véhicule partagé. Cet article ne reviendra donc pas sur la pertinence de la voiture électrique en France, qui a déjà été prouvée dans les études menées par l'Ademe (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) ou le Shift Project (Think tank français). Si la voiture électrique fait indéniablement mieux en termes d'empreinte carbone en France, elle n'est pas pour autant dénuée de défauts. Cet article vise à dresser les grands bénéfices des véhicules électriques tout en interrogeant les faiblesses de cette technologie qui peuvent mettre en péril sa pertinence dans le temps et l'espace.

Des constats scientifiques figés dans le temps

Dépolluer l'air des centres urbains, diminuer les nuisances sonores, ou encore l'empreinte carbone ; les raisons derrière les politiques publiques de soutien aux voitures électriques ne manquent pas. Il est important de noter que l'innovation autour de la voiture électrique est on ne peut plus atypique. L'approche classique est que l'innovation découle d'une proposition faite par une entreprise ou un entrepreneur au client, pour laquelle ce dernier manifeste un intérêt. Dans le cas précis de la voiture électrique, on pourra même aller jusqu'à parler de Darwinisme administré (Midler, Aloch et Chantenay, 2022) dans la mesure où le pouvoir politique agit comme un catalyseur coercitif du processus d'innovation et du choix des solutions techniques. La voiture électrique est un objet profondément disruptif. D'une part, l'intensité carbone est moindre, constat particulièrement vrai en France où l'électricité est d'origine peu carbonée. D'autre part, la capacité à effectuer rapidement et aisément de longues distances est diminuée. Lors de la prise de décision menant à la subvention de la voiture électrique, celles-ci étaient principalement des citadines. Renault Zoé et Nissan Leaf constituaient le cœur du marché de l'électrique. Ces voitures, conçues au départ pour des trajets courts avec des capacités modestes (Zoé 22 kWh et Leaf 30 kWh en 2011) ont des batteries dont les capacités ont été augmentées avec les progrès technologiques en la matière (Zoé 42 kWh, et Leaf 40 kWh en 2018). Le soutien politique s'est étendu avec un large panel de véhicules. On voit ainsi apparaître des véhicules électriques différents de ceux sur lesquels s'étaient basés les constats

scientifiques initiaux avec des dimensions plus grandes comme avec les grandes routières ou les SUV. Dans l'état de l'art actuel, la capacité à faire des longues distances n'est atteignable que sur des modèles haut de gamme, qui embarquent des batteries aussi massives qu'onéreuses. Les constructeurs se sont donc activés pour donner aux véhicules une meilleure autonomie afin d'effectuer de longs trajets. Pour cela, plusieurs leviers ont été mobilisés.

D'abord, l'augmentation de l'efficacité des véhicules mesurée en kWh/km a été permise par l'aérodynamisme des conceptions jusqu'au niveau de détail des jantes. Ce design se heurte néanmoins aux des designs vendeurs avec l'essor des SUV. Leur surface projetée engendre une traînée pénalisante pour les voyages à haute vitesse (la perte aérodynamique étant proportionnelle au carré de la vitesse). Ensuite, l'augmentation de la vitesse de chargement électrique permet d'embarquer une plus petite batterie pour faire de grands trajets. Cependant, les infrastructures ne sont pas toujours adaptées et suffisantes, et l'angoisse du client reste inchangée s'il n'est pas certain d'avoir de la place au chargeur un jour de grand départ. De plus, la dégradation lors des charges rapides est indéniable, nuisant à la durabilité (et donc également à la pertinence écologique) du véhicule électrique. C'est d'ailleurs pour cette raison que le nombre de charges très rapide est limité sur certains modèles. Enfin, l'augmentation de la taille de la batterie, solution coûteuse pour le client à l'achat du véhicule a contribué à allonger l'autonomie des véhicules. Or, cela a également diminué la vertu carbone du véhicule électrique en augmentant substantiellement l'ampleur de la dette carbone lors de la fabrication de la batterie. L'extraction du lithium est un processus extrêmement énergivore, généralement réalisé sur des grilles asiatiques peu décarbonées, représentant une part importante de l'empreinte carbone totale de la voiture.

La conception de gammes de véhicules électriques n'est donc pas simple et doit trouver des compromis entre performance et autonomie en adéquation avec des critères environnementaux. Il faudra innover à plusieurs niveaux pour véritablement conquérir tous les usages. Il faudra également veiller à ce que les choix des constructeurs ne trahissent pas l'ambition de réduction des gaz à effet de serre. La baisse des coûts au kWh incite cependant naturellement à des solutions sur étagère qui peuvent nuire au but initial d'atténuation de l'empreinte carbone.

Une pertinence géographiquement variable

Dans la plupart des modèles utilisés pour quantifier la dégradation des cellules des batteries électriques, ces dernières se dégradent selon 2 composantes : l'une dépendante du temps qui s'écoule (dite calendaire), et l'autre du nombre de cycles imposés à la chimie (dite cyclique). La dégradation d'une cellule électrochimique s'effectue lors de réactions chimiques parasites. Or l'équation d'Arrhenius, qui régit la cinétique des réactions chimiques, indique que la température augmente la vitesse des réactions, et en l'espèce, les réactions indésirables qui dégradent les cellules ne font pas exception. Toutes ces notions d'électrochimie ont pour conséquence que dans des régions chaudes du globe, la durée de vie des chimies utilisées actuellement dans les véhicules (majoritairement NMC ou LFP) est fortement tronquée, et ce indépendamment de leur usage, du fait que leur vieillissement calendaire soit accéléré.

Le développement durable de la voiture électrique fait donc face à deux barrières à l'entrée supplémentaires pour des pays en voie de développement : leurs réseaux d'alimentation électrique ne sont souvent pas suffisamment décarbonés, et les climats en général chauds ont tendance à dégrader la durée de vie des batteries. Les constats sur lesquels se basent l'impact des réductions des émissions par le développement des véhicules électriques ne seront pas forcément valides demain, du fait de l'étendue des usages automobiles qui transitent tous sans exception vers l'électrique. D'autres leviers de conciliation entre sobriété et performance que les constructeurs tentent de mobiliser existent et ouvrent de nouveaux champs d'innovation.

L'innovation en matière d' usages des véhicules et de modes de transports

Il convient de dépasser le débat public sur la pertinence du passage des véhicules thermiques aux véhicules électriques en questionnant les usages faits de l'objet voiture. En France, 95% des émissions de GES du transport sont imputables au transport routier. Voitures individuelles, véhicules utilitaires, camions : l'essentiel des flux, et donc des émissions repose sur l'utilisation des véhicules (Carbone 4). Or, aujourd'hui, dans les grandes agglomérations françaises, les voitures sont immobilisées 95% du temps (CERTU). Pour répondre au défi climatique, c'est tout le secteur de la mobilité qui doit se réinventer en favorisant de nouveaux usages responsables.

Le recours croissant des Français aux mobilités douces a été accentué par la pandémie, notamment dans les grandes villes. Les mobilités douces sont les mobilités qui font appel à la seule énergie humaine (marche, vélo, trottinette...), mais aussi tout moyen de mobilité, collectif ou individuel, contribuant à une baisse des émissions de CO2 (Vie publique, 2022). Il est intéressant de noter que le chiffre d'affaires du secteur du vélo a atteint 3,4 milliards d'euros en 2021, soit 43% de plus qu'en 2019. (Étude Union Sport & Cycle). Néanmoins, ces transports ne sont pas adaptés à tous les usages comme ceux de se déplacer en zone rurale ou non desservie par un réseau de transport collectif. L'autopartage représente une réelle opportunité. C'est pourquoi les entreprises tentent d'innover en passant d'un modèle de vente de véhicules individuels à un modèle de vente de mobilité VaaS, pour véhicule-as-a-Service.

Qu'est-ce que l'autopartage ?

À la différence du covoiturage, mode de déplacement consistant à partager son véhicule avec d'autres passagers effectuant le même trajet, l'autopartage consiste en la mise à disposition de véhicule(s) auprès d'usagers contre rémunération (abonnement ou forfait). Le principe de l'autopartage repose sur l'utilisation spontanée et flexible des véhicules dénuée de notion de propriété. Il existe différentes manières de partager la voiture. La loi d'orientation des mobilités (LOM) publiée fin 2019 et son pilier "Engager la transition vers une mobilité plus propre" ont marqué l'essor de l'autopartage et créé un cadre réglementaire pour l'organiser en renforçant le champ d'action des collectivités dans le développement des mobilités actives et partagées.

L'autopartage en station : ce type d'autopartage est le plus ancien et équivaut au service de location de voitures où le client réserve un véhicule et le récupère dans l'une des stations fixes du prestataire. L'autopartage en station recouvre l'autopartage « en boucle » avec une restitution du véhicule à la station de départ et l'autopartage en trace directe avec une restitution du véhicule dans une station

possiblement différente de celle de départ. L'autopartage en station permet au prestataire de bénéficier davantage de l'infrastructure du réseau. Ainsi, les stations peuvent être localisées et équipées de points de charge pour les véhicules électriques. L'un des leaders sur ce marché en France est l'entreprise Clem', devenue entreprise à mission depuis 2019, spécialisée dans l'autopartage de véhicules électriques et dans la recharge intelligente associée. Leader sur les territoires périurbains et ruraux (écoquartiers, bâtiments intelligents, parcs d'affaires, villes intelligentes), Clem' est présent dans plus de 100 villes.

L'autopartage sans station ou "en *free floating*": l'utilisateur n'est pas tenu de réserver en avance et peut utiliser directement la première voiture disponible à proximité. La plupart des clients utilisent ce type d'autopartage pour des déplacements en aller simple, puisque la voiture peut être laissée à n'importe quel endroit de la zone spécifiée. Le haut degré de flexibilité offert au client implique des coûts pour l'entreprise. Pour que le modèle commercial réussisse, le fournisseur doit garantir des places de stationnement dédiées sur la voie publique et assurer une bonne couverture de la zone urbaine, quitte à faire déplacer des voitures. Pour cela, une coopération étroite avec les autorités locales est essentielle. En effet, l'autopartage en flotte libre est plébiscité par les collectivités, car il ne nécessite pas l'installation d'infrastructures de recharge dédiées. On peut penser ici au service mobilize Zity de Renault, service d'autopartage 100 % électrique en *free floating*, qui fonctionne uniquement via une application mobile, et géolocalise les Zoé autour de l'utilisateur. Toutes les étapes de réservation passent par cet outil, y compris l'ouverture des portes. Le Groupe pense désormais le service d'autopartage dès l'étape de conception, en construisant des voitures adaptées, par leur robustesse extérieure, les couleurs choisies ou encore une connectivité spécifique.

L'autopartage entre employés d'une même entreprise consiste pour une entreprise à louer des véhicules à ses employés dans leur cadre professionnel (BtoB ,où le trajet est financé par l'entreprise) ou pour leur usage personnel (BtoC où le trajet est financé par l'employé).

L'autopartage entre particuliers consiste pour un particulier à louer sa voiture contre rémunération. Ce business model est comparable à celui d'AirBnb et est favorisé par l'émergence d'applications de mise en relation comme Getaround qui donne accès en quelques clics à plus de 30 000 voitures de particuliers et de professionnels en France.

Cette notion de VaaS ne relève plus de la science-fiction. Au sein de la réorganisation stratégique de Renault Group par exemple, Lucas de Meo a défini que Mobilize, qui couvre les services de VaaS du groupe, était une marque à part entière aux côtés de Dacia, Alpine et Renault. Dans une organisation tirée par les marques, c'est là un véritable adoubement de cette activité qui était auparavant reléguée au second plan. Ces réflexions stratégiques viennent redéfinir l'écosystème de la voiture.

Les innovations de l'écosystème des voitures électriques

La voiture électrique s'inscrit dans un système énergétique complexe. La vocation écologique de la voiture électrique n'est valable que sous certaines conditions: l'électricité consommée doit être produite avec un faible impact écologique. Dès lors, la recharge des voitures électriques met en lumière plusieurs défis et opportunités.

Les sources d'énergie électrique

L'électricité nécessaire au bon fonctionnement du parc de véhicules électriques dépend de l'accessibilité et du prix des sources de production de cette même électricité.

Aujourd'hui, la majorité de l'électricité produite en France provient des centrales nucléaires. Cette énergie est considérée comme peu carbonée dans la mesure où les émissions sont limitées à la construction et à l'utilisation de la centrale ainsi que l'acheminement de l'uranium nécessaire à son fonctionnement. Néanmoins le parc d'infrastructures nucléaires en France est aujourd'hui vieillissant et doit faire l'objet de nombreuses opérations de maintenance. Par ailleurs, on fait aujourd'hui face à une crise de l'énergie qui provoque une forte augmentation des prix. Si cet épiphénomène était amené à perdurer dans les années à venir, le prix de l'énergie deviendrait un frein au développement des véhicules électriques, en particulier dans les pays pour lesquels la production électrique se fait par les énergies fossiles.

La tension entre pics de consommation d'énergie et pics de production

L'électricité nécessaire au fonctionnement des véhicules est une source d'énergie encore difficile à stocker. Le système électrique doit ajuster en temps réel la production d'électricité aux fluctuations de la consommation électrique. Or, les pics de production et les pics de consommation d'électricité ne coïncident pas toujours. Les pics de consommation en France surviennent généralement en fin de journée en hiver lors des vagues de froid, entre 18h et 22h du fait de l'utilisation d'appareils électriques couplée à l'allumage du chauffage et lampes dans les logements.

Or, les sources d'énergies renouvelables sont souvent considérées comme des énergies intermittentes "non-pilotables". Cela signifie qu'elles ne produisent pas à la demande ou en continu, mais à des moments que l'on ne maîtrise pas. Concrètement, une éolienne produit lorsque les conditions climatiques sont réunies : lorsqu'il y a suffisamment de vent. De même, le pic de production d'énergie solaire survient en milieu de journée lorsque le soleil est haut et la production est plus faible au moment du pic de consommation en fin de journée. Dès lors, pour répondre à ces importantes variations d'importante demande, des moyens de production d'électricité complémentaires doivent être activés. Si certaines énergies renouvelables sont relativement pilotables comme l'énergie hydro-électrique, l'appel à l'énergie thermique pour compenser ces écarts entre production et consommation est crucial. Dès lors, dans le cadre des voitures électriques, il convient de s'interroger sur l'interfaçage avec ces pics de consommation électrique.

Selon une étude réalisée par RTE en 2017, le système électrique français peut "accueillir jusqu'à 15 millions de véhicules électriques d'ici 2035 sans difficulté majeure". Néanmoins, il faut prendre garde à ce que l'ensemble des véhicules électriques ne chargent pas tous en même temps, et que cette charge massive n'ait pas lieu en même temps que les pics de demande d'électricité évoqués précédemment. Pour cela, il faut que les automobilistes soient en mesure de recharger leurs véhicules sur leur lieu de stationnement pendant la journée, et pas seulement à leur domicile. De même, une distinction de tarif heures/pleines heures creuses pourrait être mise en place. La possibilité d'utiliser l'électricité stockée dans la batterie des voitures électriques offre aussi de nouvelles perspectives aujourd'hui.

Optimiser l'énergie électrique du parc automobile en circulation

Les défis présentés par la crise de l'énergie remettent à l'ordre du jour les dernières innovations relatives à l'utilisation de l'énergie du parc de voitures électriques. Comme ces dernières ne sont utilisées qu'une faible partie du temps, l'utilisation de l'électricité stockée dans leur batterie offre des possibilités. La technologie V2G (vehicle to grid) ou B2G (Battery to Grid) permet de puiser et de redistribuer l'énergie stockée dans la batterie d'un véhicule électrique vers le réseau électrique. (Virta, 2022). Ce stockage "tampon" permettrait d'aligner la production sur la consommation au niveau du réseau électrique national. Elle constitue une brique des réseaux intelligents qui s'appuient sur des compteurs individuels. Ces derniers sont capables de transmettre en temps réel des informations sur la consommation des ménages et des entreprises.

Ainsi, le développement de la voiture électrique s'accompagne d'une réflexion sur la définition de l'objet voiture, avec de nouveaux usages potentiels, dans un écosystème plus large englobant jusqu'aux producteurs d'électricité. En ce sens, penser la production de véhicules électriques en France, et plus largement sur le territoire européen devient un enjeu de transition écologique global qui interroge sur nos modes de production et de consommation. L'impulsion politique doit donc également prendre en compte ces phénomènes. Le soutien à la voiture électrique peut s'élargir à l'appui à l'auto-partage mais va également de pair avec la sécurisation d'une production électrique renouvelable.

BIBLIOGRAPHIE

Midler, C., Alochet, M., & de Charentenay, C. (2022). *L'odyssée de Spring: Histoire et leçons d'un projet impossible*. Dunod.

WEBOGRAPHIE

2020-02-04_Étude-de-l'impact-carbone-de-loffre-de-véhicules_V1.pdf. (s. d.). Consulté 16 décembre 2022, à l'adresse https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2020/02/2020-02-04_%C3%89tude-de-l'impact-carbone-de-loffre-de-v%C3%A9hicules_V1.pdf

Avis-ademe-voitures-electriques-et-bornes-recharges-2022-012013.pdf. (s. d.). Consulté 16 décembre 2022, à l'adresse https://librairie.ademe.fr/cadic/7432/avis-ademe-voitures-electriques-et-bornes-recharges-2022-012013.pdf?modal_token=9cf191ee43c50c13520b123e045d0584&modal=true&cookies_allowed=true&open=true&firstname=Soufiane&lastname=Lamalam&email=lamalam.soufiane%40gmail.com&rgpd=on&submitted=1

Clem', 1ère PME du secteur de l'autopartage à devenir une entreprise à mission. Clem'.
<https://www.clem-e.com/post/clem-1ère-pme-du-secteur-de-l-autopartage-à-devenir-une-entreprise-à-mission>

Cours Mines Paris Tech juin 2019 – Jean-Marc Jancovici. (s. d.). Consulté 16 décembre 2022, à l'adresse <https://jancovici.com/publications-et-co/cours-mines-paristech-2019/cours-mines-paristech-juin-2019/>

Les enquêtes Déplacements standard Certu.pdf. (s. d.). Consulté 16 décembre 2022, à l'adresse https://www.cnis.fr/wp-content/uploads/2017/12/DPR_2013_2e_reunion_COM_territoires_enquetes_deplacements_certu.pdf

Presentation_webinaire_vehicule_electrique.pdf. (s. d.). Consulté 16 décembre 2022, à l'adresse https://www.carbone4.com/files/Presentation_webinaire_vehicule_electrique.pdf

Transports : Le défi écologique des nouvelles mobilités. (s. d.). vie-publique.fr. Consulté 16 décembre 2022, à l'adresse <https://www.vie-publique.fr/eclairage/279082-transports-le-defi-ecologique-des-nouvelles-mobilites>

Pour citer cet article :

Lamalam, S., Petit de Bantel, D., & Puech T. (2022). La voiture électrique : d'un objet technique à une innovation systémique et des usages de mobilité efficaces pour le climat., *Les échos de l'innovation, Observatoire Projet, Innovation, Conception (PIC)*, mis en ligne le 19 décembre 2022.

L'Observatoire PIC regroupe les publications diverses que les enseignants et les étudiants produisent à partir de leurs travaux et réflexions : publications (livres, articles ou communications à des colloques du domaine), cahiers du master PIC (support de valorisation des mémoires de recherche, coécrit entre les étudiants et les tuteurs), les échos de l'innovation, et vidéos (issues des soutenances publiques)

www.masterpic.fr/observatoire