La place du véhicule autonome pour une mobilité propre

Auteurs : Pierre Romet, Franck Gechter, El-Hassane Aglzim, Benoîte Lefort, Sidi Mohammed Senouci
UTBM F-90010 Belfort Cedex
Email {prénom.nom@utbm.fr}
Email {prénom.nom@u-bourgogne.fr}

Février 2019

Accroche

Ayant pris conscience des problèmes sociétaux et environnementaux causés par le transport de personnes et de marchandises, une mutation du secteur s'est initiée avec le retour des véhicules électriques ainsi que de leur autonomisation.

Résumé

Parmi les éléments principaux liés à la révolution du numérique, le véhicule autonome fait figure de porte-drapeau destiné à faire évoluer drastiquement nos habitudes en matière de mobilité. Outre des progrès importants attendus en terme de sécurité, le véhicule autonome doit également apporter des améliorations substantielles en matière d'impacts environnementaux. Cet article effectue un tour d'horizon des progrès liés au concept de véhicule autonome et recense les progrès attendus à plus ou moins long terme.

Abstract

As part of the principal components related to the digital revolution, the autonomous vehicle is standard-bearer designed to drastically change our habits in terms of mobility. Besides the expected important progresses in terms of security, the autonomous vehicle should provide an impact on the environmental level as well. This article gives an overview of current and long-term progresses expected around the autonomous vehicle concept.

1. Introduction

L'autonomisation des véhicules est l'un des éléments importants de la révolution numérique en cours. Si l'idée de véhicule autonome n'est pas récente, les progrès réalisés dans les technologies de la communication et de l'information et plus particulièrement en intelligence artificielle permettent de transformer ce qui était alors qu'une idée en réalité. Bien que les verrous actuels restent assez nombreux tant du point de vue perception et contrôle des véhicules que du point de vue de l'acceptabilité, intégration du facteur humain, éthiques ou légaux, la présence de véhicules autonomes partageant la route avec des véhicules classiques est déjà une réalité. En effet, outre les nombreuses expérimentations en cours ou à venir, telles que les navettes Navly sur Lyon expérimentées depuis 2016, des véhicules autonomes de niveau 2 sont déjà commercialisés.

Au-delà de l'intérêt scientifique et technologique, l'autonomisation des véhicules permet d'envisager des progrès au niveau sociétal, que ce soit en terme de sécurité routière, de gestion de trafic ou de création de nouveaux services de transport. Parmi les avancées possibles, l'utilisation des fonctionnalités autonomes pour réduire l'impact écologique des véhicules et plus généralement des systèmes de transport est l'une des plus importantes.

L'objectif de cet article est de recenser les progrès prévisibles et/ou attendus en terme de mobilité propre grâce aux fonctionnalités associées aux véhicules autonomes. Après une explication du concept de véhicule autonome et une définition des différents niveaux d'autonomie (section 5), il s'agira de poser la problématique de la mobilité propre de manière générale (section 6). L'impact des fonctionnalités autonomes sur la mobilité propre est explicité dans la section 7 que ce soit au niveau du véhicule, au niveau d'un groupe de véhicule ou encore du système de transport dans son ensemble. Enfin, avant le paragraphe section 9 qui conclut l'article, la section 8 effectue un tour d'horizon des progrès concernant l'utilisation de l'énergie dans les véhicules autonomes.

2. Le véhicule autonome

Un véhicule autonome peut être défini comme un véhicule capable d'évoluer dans son environnement sans contrôle humain. Pour réaliser cette tâche, le véhicule autonome est généralement pourvu de capacités perceptives s'appuyant sur un ensemble de capteurs, associés à des algorithmes de traitement, de capacités de communications pour échanger des informations avec les autres véhicules et/ou avec les infrastructures et de capacité de décision reposant à la fois sur des algorithmes de contrôle et sur des algorithmes de prise de décision utilisant des méthodes issues de l'intelligence artificielle. Dans la littérature, les véhicules autonomes peuvent se trouver sous différentes dénominations telles que véhicules robotisés ou véhicules sans conducteur par exemple. Il est également intéressant de faire la différence entre les notions de véhicule autonome et véhicule automatisé. En effet, si le véhicule autonome requiert obligatoirement un processus de décision autonome, le véhicule automatisé peut uniquement s'appuyer sur des artefacts technologiques ou techniques pour réaliser certaines tâches.

Le concept de véhicule autonome n'est pas récent. L'idée date des années 20 mais les premières réalisations techniques sont apparues dans les années 50 et 60. Durant les années 80, le véhicule autonome a été l'objet de nombreux projets académiques et industriels. Le véritable engouement pour le sujet date du début des années 2000 en particulier avec le concours organisé par la DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) à partir de 2004. La figure 1 montre un bref historique des avancées vers le véhicule autonome.

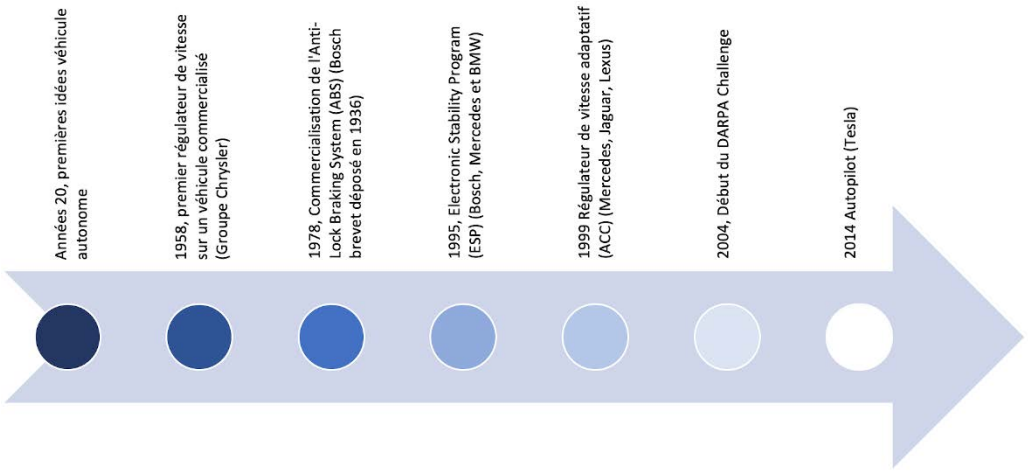


FIGURE 1 : LES DIFFERENTES ETAPES VERS LE VEHICULE AUTONOME

Il est difficile de parler d'un seul type de véhicule autonome. Aussi, les facultés d'autonomie des véhicules sont classées dans une échelle pouvant avoir jusqu'à six niveaux. Parmi les méthodes de classifications existantes qui diffèrent principalement par les critères d'autonomie choisis, la classification proposée par la SAE (Society of Automotive Engineers) aux États-Unis est la plus répandue [1]. La figure 2 présente les différents niveaux d'autonomie, le niveau 0 correspondant à un véhicule contrôlé uniquement par un opérateur humain.

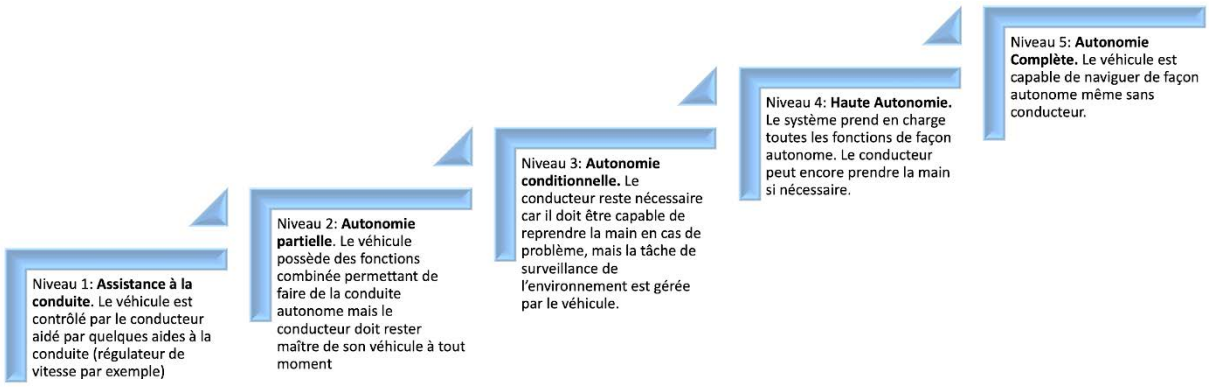


FIGURE 2: LES DIFFERENTS NIVEAUX DE LA CLASSIFICATION SAE

Actuellement, il n'existe pas de véhicule commercialisé autonome de niveau 5, la législation actuelle ne permettant la commercialisation que de véhicules de niveau 2 (voire 3 sous certaines conditions). Aussi, les aides à la conduite, connues sous le nom d'ADAS (Advanced Driver-Assistance Systems), sont également des éléments importants pour atteindre cette autonomie complète. Parmi les ADAS les plus courants nous pouvons citer les systèmes de type ABS, ESP, régulateurs de vitesse adaptatifs, systèmes d'aide de maintien en file...

Quels sont les objectifs principaux motivant la volonté d'aller vers des véhicules de plus en plus autonomes ? Au-delà des préoccupations liées à la sécurité routière et aux manques d'attention du conducteur (90 % des accidents de la route sont dus à des erreurs humaines), les avancées possibles en terme de mobilité propre font partie des attendues les plus importants. Les progrès peuvent être réalisés soit en améliorant l'efficacité du véhicule lui-même dans sa dynamique, soit au niveau d'un groupe de véhicules, ou du réseau de transport en améliorant la fluidité du trafic et donc en diminuant les temps de trajets.

3. La mobilité propre

Les chiffres actuels montrent que, d'ici à 2050, les émissions de gaz à effet de serre provenant du secteur des transports vont augmenter d'au moins 60 % par rapport aux années 90 du fait de l'accroissement constant de la demande de mobilité. Aujourd'hui, les transports représentent environ un quart des émissions de gaz à effet de serre de l'UE, le transport routier étant à lui seul responsable de 22 % de ces émissions. De nouvelles réductions des émissions dues au transport routier sont donc indispensables pour respecter les engagements qu'a pris l'UE au titre de l'accord de Paris. Les objectifs sont: lutter contre les dangers du changement climatique et améliorer la qualité de vie des citoyens. Il est donc indispensable de renforcer une mobilité propre qui soit pratique, peu polluante et respectueuse de l'environnement, ainsi que du cadre de vie.

La mobilité propre ou durable (écomobilité) concerne tant l'urbanisme, les infrastructures et l'organisation du réseau de transport, que les applications technologiques ou encore la sensibilisation et l'éducation des populations. Elle repose sur l'application et le développement de principes d'organisation et de technologies qui favorisent la réduction des émissions de polluants et de gaz à effet de serre, les modes de déplacements alternatifs et doux ainsi que les transports en commun. Concrètement, elle se traduit en différentes actions telles que :

- Le développement des véhicules à faibles émissions (voitures électriques, hybrides, à biocarburant, etc.) et le déploiement des infrastructures permettant leur alimentation ;
- L'amélioration de l'efficacité énergétique du parc de véhicules ;
- Les reports modaux de la voiture individuelle vers des transports en commun terrestres plus fiables, le vélo et la marche, ainsi que du transport routier vers le transport ferroviaire et fluvial;
- Une intermodalité facilitée par des modes de déplacements (train, tramway, voiture, vélo, etc.);
- Le développement des modes de transports collaboratifs : autopartage ou covoiturage;
- L'augmentation du taux de remplissage des véhicules de transport de marchandises;
- La mise en place de plans de déplacement urbain et de plans de déplacement en entreprises avec des alternatives au transport physique (télétravail, coworking, etc.) qui limiteront les déplacements/embouteillages et ainsi améliorer l'impact environnemental et la qualité de vie des citoyens;
- Le développement d'applications technologiques, dans le domaine du transport, des véhicules, de la gestion des flux et de la gestion du temps. L'objectif étant d'améliorer l'efficience et l'efficacité énergétique de chaque mode de transport, éventuellement dans un esprit d'économie de service;
- La sensibilisation et une éducation de la population (écoconduite, partage de la chaussée, etc.).

Certaines de ces mesures ont déjà montré des effets positifs dans certaines villes ou régions, mais parfois la mise en œuvre reste un défi majeur impliquant à la fois une mise en œuvre de haute qualité de systèmes innovants, et une nécessité de trouver la confiance et l'acceptation de nombreuses parties prenantes. Dans la section suivante, nous allons montrer en quoi le véhicule autonome représente une des solutions pour une mobilité propre.

4. Impact du véhicule autonome pour une mobilité propre

Outre les avantages qu'il peut apporter en terme de sécurité et de service, le véhicule autonome peut avoir des impacts sur la mobilité propre à plusieurs niveaux, qu'il s'agisse d'actions au niveau du véhicule, d'un groupe de véhicules ou du réseau de transport lui-même. Ainsi nous pouvons espérer un certain nombre de progrès incluant: (1) un meilleur contrôle du véhicule, (2) une meilleure coopération entre véhicules, (3) des systèmes de transport innovants et écoresponsables (figure 3).

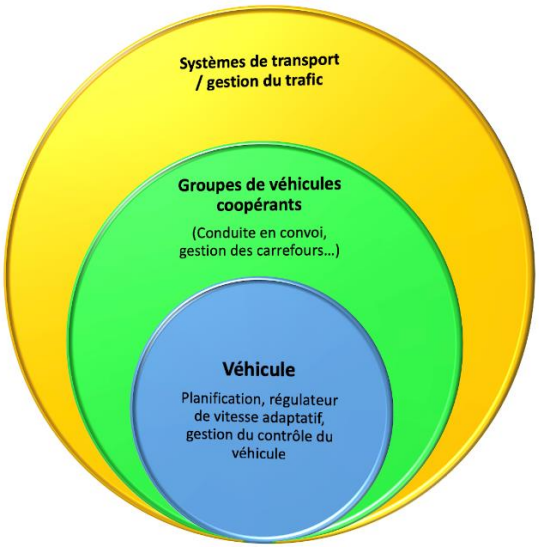


FIGURE 3 : LES DIFFERENTS NIVEAUX DE L'IMPACT DU VEHICULE AUTONOMES SUR LA MOBILITE PROPRE

1. *Un meilleur contrôle du véhicule*

L'impact des fonctionnalités autonomes est déjà présent au niveau de la conduite du véhicule tant au niveau du contrôle bas niveau (vitesse/accélération) que de la planification d'itinéraires.

Le régulateur de vitesse adaptatif est une aide à la conduite qui associe un régulateur de vitesse classique et des radars placés à l'avant du véhicule. Il permet de maintenir une vitesse constante et de respecter une distance de sécurité avec le véhicule qui le précède. De par ses facultés d'anticipation, ce régulateur adaptatif permet de mettre en œuvre plus facilement, et de manière automatique, les principes de l'écoconduite. L'écoconduite [2] se définit comme un ensemble de comportement et de procédure à appliquer pour garantir une consommation de carburant la plus faible possible. Elle s'articule autour de trois axes : les vérifications d'usages avant d'utiliser le véhicule, le comportement sur les premiers kilomètres, et la mise en place du principe d'anticipation devant permettre de minimiser les phases répétées d'accélération et de freinage souvent observées en agglomération. Lorsque l'on compare la conduite induite par l'utilisation d'un régulateur adaptatif avec l'écoconduite, un comportement commun émerge : l'anticipation. De plus, grâce au contrôle de la distance inter-véhicule, on peut observer une automatisation du comportement d'anticipation, permettant de réduire la consommation de carburant et à plus grande échelle, de fluidifier le trafic. De même que l'anticipation au niveau de la vitesse, une gestion réfléchie de l'accélération appliquée au véhicule est un facteur de consommation déterminant. Ainsi, en fonction des modes de conduite sélectionnés et des profils de routes suivies, il est intéressant de laisser le véhicule déterminer son profil d'accélération.

Par exemple, un véhicule se trouvant en montée peut choisir de fixer sa vitesse à 120 au lieu de 130 km/h minimisant ainsi sa consommation, en désactivant l'accélérateur. De même, le véhicule peut également choisir de minimiser l'accélération lorsque ce dernier se trouve dans un embouteillage. Bien évidemment, ces mécanismes doivent pouvoir être désactivés lors de situations à risque.

Enfin, la planification et l'optimisation d'un itinéraire selon des critères de temps, de vitesse et de distance et un sujet contemporain d'application et de recherche dans le secteur du transport et de la logistique. Par le biais d'une optimisation multicritères, l'objectif est de minimiser l'impact économique, humain et écologique du transport. L'optimisation du transport peut être abordée au travers d'algorithmes garantissant une solution optimale d'un échantillon de faible ampleur, ou grâce à des algorithmes apportant une solution approximative, sur un échantillon de grande taille. Pour cette catégorie, on peut prendre pour exemple des algorithmes bio inspirés du type colonie de fourmis (ou Ant-Colony Optimisation) qui permet d'observer la construction dynamique et émergente d'une solution pour la détermination du chemin optimal. Ainsi, la planification, combinaison du contrôle bas niveau et de l'optimisation d'itinéraire, engendre une réduction substantielle de l'empreinte carbone du véhicule de transport. Cependant bien que ces optimisations généralisées à un groupe de véhicule permettent de réduite l'impact environnemental du transport, elles ne transcendent pas la portée locale du véhicule. Pour cela, il est nécessaire de mettre en place des méthodes afin de faire émerger les aspects collectifs multi-niveaux du problème.

2. Véhicules connectés en coopération

Au-delà du véhicule lui-même, la notion d'autonomie inclut également une dimension coopérative entre les véhicules. Cette coopération peut prendre plusieurs formes, de la synchronisation dans le temps et dans l'espace d'un groupe de véhicules, à des mécanismes de prise de décision collectifs.

Parmi ces éléments, la conduite en convoi est de plus en plus répandue. Elle est définie comme un ensemble de stratégies de coordination d'un peloton, pouvant être mis en œuvre en fonction des situations rencontrées sur le terrain [3]. Un peloton (ou convoi) est un ensemble coordonné et organisé, pouvant évoluer à faible distance et à haute vitesse, dirigé par un « véhicule leader ». Les autres véhicules dit "suiveurs" vont, en fonction de la stratégie adoptée [4], se positionner par rapport au « véhicule leader » ou au véhicule qui le précède. De plus, afin d'assurer la cohésion du convoi, les véhicules peuvent communiquer ensemble, partageant emplacement, position, vitesse, ou encore objets et obstacles de leur environnement, ainsi que des consignes d'actions [5].

La conduite en convoi est particulièrement pertinente lorsque l'on cherche à analyser la situation sur les grands axes routiers et les autoroutes sur lesquels nous sommes bien souvent confrontés à des engorgements et à leurs effets secondaires tels que les "effets accordéon" ; effets semblant être liés aux comportements des usagers [6], mais outre l'aspect comportemental des conducteurs, les embouteillages apparaissent aussi lorsque le trafic devient trop dense pour être absorbé par le réseau routier. Ainsi, le « platooning » semble apporter une réponse adaptée au problème, permettant de minimiser tout comportement pouvant faire apparaître un "effet accordéon".

De plus, cherchant à étendre la perception locale d'un véhicule en le dotant de communication avec d'autres véhicules ainsi qu'avec l'infrastructure routière, il serait possible de réguler le trafic, peu importe sa densité. Une propagation locale (ou inter-véhicule) serait à même de partager rapidement une information afin d'adapter la situation à un accident ou de prévenir

un potentiel danger, alors qu'une communication globale permettrait de faire parvenir une information à plus grande distance, afin d'adapter le trafic en amont [7].

Élargir la perception du véhicule s'avère aussi importante au sein des agglomérations. La gestion du trafic serait effectuée en interagissant avec des équipements tels que les feux de signalisation ou encore les croisements. De plus, il est possible d'aller encore plus loin en proposant une gestion active du trafic pour une mobilité plus durable [8].

3. Systèmes de transports

Un système de transport se définit par l'application des nouvelles technologies au secteur du transport et/ou de la logistique, et couplé au véhicule autonome doit permettre une accentuation de l'éco-mobilité, en favorisant des moyens de transport respectueux de l'environnement et du cadre de vie.

L'un des premiers points supporté par un système de transport est le transport public de personnes en milieu urbain qui est aujourd'hui une problématique majeure dans les agglomérations tant du point de vue écologique, que du trafic. Afin de pallier l'encombrement des centres urbains et la pollution, des solutions comme le projet "CRISTAL" du groupe "Lohr industry" cherche à répondre à la demande de mobilité toujours croissante. Proposant un service de véhicules autonomes individuels ou en optimisant en temps réel, le nombre de véhicules d'un train d'automobiles circulant en ville.

Le deuxième axe sur lequel se positionne les systèmes de transport est le frêt de marchandises en milieu urbain. Cherchant à limiter l'impact des gros véhicules de transport, ils tentent d'apporter une nouvelle conception du frêt en faisant circuler des véhicules autonomes légers se chargeant de la livraison de marchandises destinées aussi bien aux particuliers qu'aux professionnels. Évoluant en convoi ou en véhicule seul, ces véhicules sont capables d'adapter leur nombre et leurs destinations afin de s'adapter à la charge transportée. De telles solutions peuvent être illustrées au travers des projets "SURATRAM", ainsi que le projet "EZ-Pro".

Enfin, le dernier point couvert par les systèmes de transport est lié aux plans de logistique urbaine. La logistique urbaine définit la manière dont les marchandises entrent, circulent et sortent des centres urbains. Elle revêt des enjeux économiques, de par l'optimisation des transports et des coûts liés aux livraisons et de santé, de par les émissions de gaz et de particules causées par la circulation de fret. Mais laisser chaque acteur du transport agir indépendamment aboutit à une congestion des centres urbains. Une solution apportée, notamment par le projet "Transport Collaboratif dans la Distribution Urbaine" et la mise en place de centres de distributions urbains [9] devant absorber le frêt à destination des villes, pour ensuite le distribuer en optimisant les tournées réalisées avec des véhicules peu polluants.

Au travers du contrôle du véhicule autonome et de l'élargissement de sa perception locale, nous avons pu analyser le rôle de la voiture autonome pour une mobilité propre aussi bien à l'échelle de la voiture qu'à l'échelle d'un réseau, ainsi que ses enjeux. De plus, au travers des plans de logistique urbaine développés de manière durable, afin de minimiser l'impact du frêt dans les centres urbains, nous avons pu observer que la voiture autonome propose des pistes d'amélioration future sur des enjeux qu'ils soient économiques, environnementaux, ou encore liés au trafic.

5. Quelle énergie pour le véhicule autonome propre ?

Depuis plusieurs années, le domaine de l'automobile s'est développé et a progressé grâce à une source abondante, bon marché et énergétiquement performante qui est l'énergie fossile. Le véhicule thermique, et de manière générale le transport conventionnel, a depuis plus d'un siècle, été le moyen de mobilité privilégié et sur lequel se sont concentrés ingénieurs et chercheurs. De plus, pendant le développement de la voiture thermique, la dimension environnementale n'était guère une préoccupation.

Puis le temps de la rareté et de la cherté des matières premières est arrivé, dû à une hausse croissante de la demande mondiale et à la prise de conscience d'un possible épuisement des réserves. La protection de l'environnement est également devenue une préoccupation majeure imposée par le succès de la COP21, engageant les pays du monde entier dans la limitation de leurs rejets de CO_2 et mettant de fait sur la sellette le pétrole et le moteur thermique.

Les ingénieurs et chercheurs ont donc dû innover et trouver des solutions. Le domaine de l'automobile, soumis à des réglementations de plus en plus sévères, a poussé les constructeurs à améliorer les performances des véhicules thermiques, ainsi que le développement de nouveaux carburants réduisant ainsi la consommation des véhicules et leurs émissions polluantes. Parallèlement à cela, l'industrie automobile a énormément investi, depuis 2011, pour développer de nouvelles solutions et motorisations propres à l'image des voitures électriques (VE) et hybrides (VEH).

1. *Le véhicule électrique et hybride*

La voiture électrique a pendant longtemps suscité du scepticisme chez les constructeurs, notamment au vue de son autonomie comparée à celle du véhicule thermique et du prix des batteries embarquées. Le principal avantage de la voiture thermique est sa grande autonomie, possible par la quantité d'énergie produite par l'essence embarquée. Mais l'utilisation de cette énergie pose un problème de santé publique et environnemental qui nécessite aujourd'hui d'autres solutions. Le VE apparaît alors comme une des solutions pouvant aider à la diminution des rejets de polluants dans l'atmosphère.

Depuis, les politiques publiques de soutien au VE se sont multipliées, tout comme les investissements des constructeurs forcés de réduire les rejets CO_2 de leur véhicules mis sur le marché. Les scandales de trucage des moteurs thermiques (Dieselgate) ont de plus exacerbé la contestation des véhicules polluants, obligeant les constructeurs à accélérer le développement du VE. Le prix des batteries a sensiblement baissé et leur autonomie progresse. Ainsi, de très nombreux nouveaux modèles 100 % électriques et hybrides sont depuis peu proposés par la plupart des constructeurs dans leur gamme de véhicules.

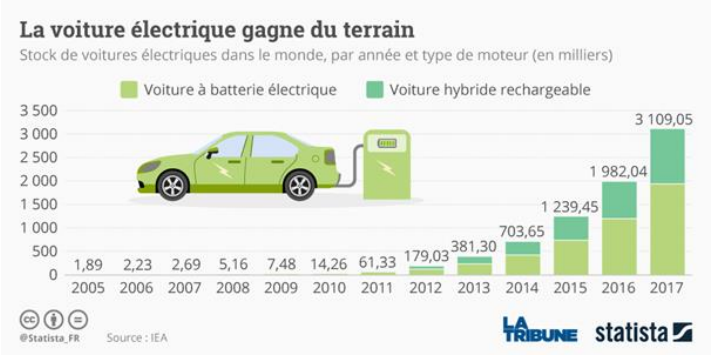


FIGURE 4: ÉVOLUTION DU STOCK DE VOITURES ELECTRIQUES ET HYBRIDES DANS LE MONDE

De plus, la maturité des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), des systèmes informatiques et électroniques et leur utilisation, facilitée par la motorisation électrique, ouvre de multiples possibilités d'innovations et de nouveaux services (comme le véhicule autonome). Le développement de ce véhicule, pouvant se localiser et se déplacer seul, arrive donc dans ce contexte et profite ainsi d'une motorisation propre, moins polluante et pour laquelle le domaine de la recherche et du développement s'est beaucoup investi. Ainsi, de nos jours, les prototypes de véhicule autonome profitent des motorisations conventionnelles matures les moins émettrices de CO_2 ou de motorisations électriques pour lesquelles l'autonomie est en forte hausse.

Les coûts du VE se trouvent majoritairement à la fabrication. En effet, le VE consomme moins d'énergie qu'un véhicule Diesel en fonctionnement car sa chaîne de traction, purement électrique, présente un excellent rendement énergétique. Alors que pour un véhicule thermique, les pertes et frottements sont plus importantes. Malgré cela, sur l'ensemble du cycle de vie d'un VE, la consommation énergétique est globalement proche de celle d'un véhicule conventionnel. En effet, la production de l'électricité nécessaire pour recharger ses batteries est importante. Ainsi la consommation énergétique du "puits à la roue" reste significative.

Réciproquement, le développement du VE permet de réduire la dépendance à l'utilisation du pétrole comme source d'énergie, d'autant plus que l'utilisation des énergies renouvelables est en forte progression. La perspective de mix électrique intégrant une part croissante de ces énergies renouvelables est également intéressante. Cela présente, à la fois, un intérêt économique et environnemental.

En Angleterre, une étude [10] démontre que, les véhicules électriques et hybrides se révèlent plus économes à la fin de leur cycle de vie par rapport à une voiture conventionnelle même s'ils sont plus polluants à produire. Selon l'étude, la fabrication d'une voiture électrique engendrerait 8,8 tonnes d'émissions de CO_2 contre seulement 5,6 tonnes pour une voiture thermique et est donc beaucoup plus polluante à la production. A l'inverse, en fin de cycle de vie, la voiture électrique se retrouverait plus économe avec 19 tonnes de CO_2 émis en fin de vie contre 24 tonnes pour une voiture conventionnelle, notamment grâce à ses faibles émissions de CO_2 à l'usage. A préciser que les calculs CO_2, du "puits à la roue", reposent sur le mix énergétique anglais qui a été évalué à 500g/kWh.

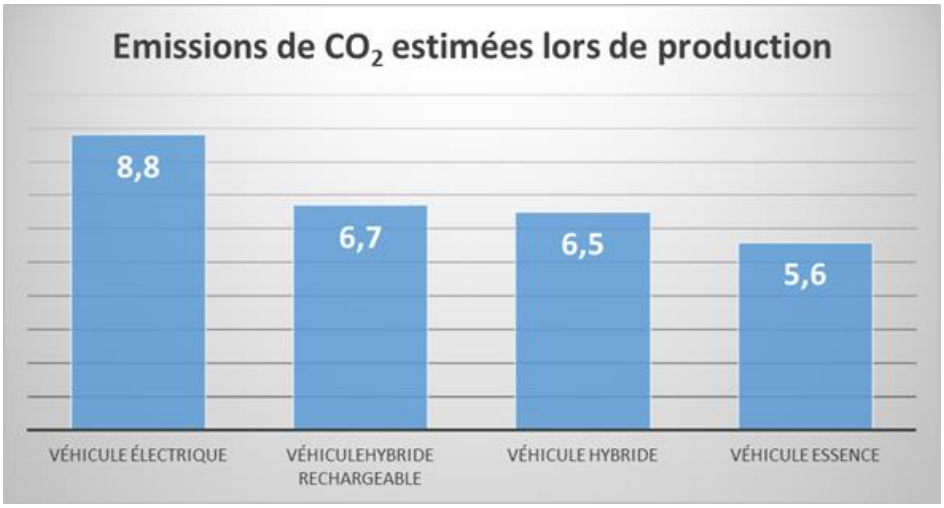


FIGURE 5:ÉMISSIONS DE CO_2 ESTIMEES LORS DE PRODUCTION POUR DIFFERENTS TYPES DE VEHICULE (EN TONNES)

Selon le mix énergétique de certains pays, le VE, entre la fabrication de la batterie et son utilisation, finit par émettre plus de CO_2 que le thermique [11]. Par exemple, si les émissions de CO_2 d'un VE en France sont de l'ordre de 40g de CO_2/km, grâce à la forte proportion dans notre pays d'électricité produite à partir du nucléaire, soit bien en-dessous des 130g actuellement émis par un véhicule thermique, au Japon ou en Corée ces émissions atteignent 130g et le record est atteint en Chine qui utilise des centrales au charbon, avec 200g.

La plupart des impacts environnementaux d'un VE se situent donc durant la phase de fabrication à la différence du véhicule Diesel. Au niveau économique, le VE reste globalement plus cher à l'achat qu'un véhicule Diesel (majoritairement dû au coût de la batterie embarquée). Son usage permet, en effet, des économies significatives car le coût de l'électricité et de l'entretien sont moindres.

Compte tenu de ces versatilités, il est très difficile de conclure que le VE est une véritable solution aux enjeux d'efficacité énergétique et plus particulièrement dans son utilisation pour une mobilité propre et autonome. D'un côté une technologie automobile thermique qui a bénéficié de recherche et développement continues depuis plus d'un siècle réduisant ainsi le coût et pouvant se recharger en carburant en quelques minutes et d'un autre côté, une technologie qui, à l'heure actuelle, ne permet de parcourir que quelques centaines de kilomètres et qui nécessite de patienter 8 heures pour une recharge de batterie complète.

Malgré cela, les décisions politiques favorisant la préservation de l'air dans nos villes, passant par des incitations financières pour les acheteurs de véhicules neufs et contraintes de plus en plus fortes sur les constructeurs, favorisera à terme l'utilisation de la solution électrique et/ou hybride pour le transport autonome.

2. Avenir du moteur thermique et nouveaux carburants

Les moteurs à combustion actuels ont été optimisés sur plus d'un siècle pour être utilisés avec des carburants issus du pétrole. Les deux modes de combustion dans les moteurs sont radicalement opposés : la combustion à allumage par étincelle (SI spark ignition ou moteur essence) et la combustion à allumage par compression (CI compression ignition ou moteur Diesel). Si la combustion du SI est caractérisée par la présence d'une flamme dans un mélange homogène et l'utilisation de carburants à indice d'octane élevé (essence, gaz naturel, gaz de pétrole liquéfié, alcools, etc.), le concept de combustion CI repose sur une flamme de diffusion non homogène et requiert un carburant avec une forte tendance à l'auto-inflammation (gazole, huile, esters, etc.) [12].

Même dans le pire des scénarios, les moteurs à combustion interne seront utilisés pendant plusieurs décennies [13]. En outre, ils constituent la base de certaines solutions de remplacement (comme le véhicule hydride électrique) et peuvent servir de facilitateurs pour d'autres, comme pour les hybrides « plug-in ».

Les nouveaux biocarburants dérivant de sources de biomasse non comestibles, déchets organiques, biomasse cellulosique et des huiles dérivées d'algues [14] peuvent contribuer à réduire la dépendance énergétique vis-à-vis des combustibles fossiles et réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des transports. Nombreuses sont les recherches pour le développement de nouvelles technologies pour transformer la biomasse en différents carburants dans le but d'augmenter leur efficacité et de réduire les coûts de production [15,16].

Deux possibilités sont envisagées pour assurer la transition énergétique connaissant l'influence des composés chimiques sur la combustion dans les moteurs et leurs émissions à l'échappement. Soit l'adaptation du carburant à la technologie existante, soit l'optimisation du contrôle moteur en fonction du carburant. Sur le court terme, la première semble être le plus

probable car beaucoup plus facile à accomplir. Cependant avant qu'un carburant soit compatible, ce dernier subit des traitements représentant un coût qui doit être pris en compte. Réduire les traitements pourrait améliorer le cycle global de vie d'efficacité énergétique mais les différences de combustion et des émissions polluantes de ces nouveaux carburants doivent être étudiées précisément [16]. De même, d'importantes recherches sur les moteurs à combustion interne avancés visent à améliorer l'efficacité, tout en réduisant les émissions de polluants, en utilisant la stratégie de combustion à basse température (LTC). En effet, le développement de nouveaux concepts de LTC entraîne notamment une réduction des NOx en raison de la forte énergie d'activation des réactions de formation de NO. Les stratégies LTC comprennent l'allumage par compression de charge homogène (HCCI), allumage par compression de charge pré-mélangée (PCCI) et allumage commandé par compression à réactivité contrôlée (RCCI) [13]. Ces nouveaux concepts nécessitent l'utilisation de carburants spécifiques mais dont leurs propriétés sont plus proches contrairement à l'essence traditionnelle et le gazole, ce qui stimulera la demande de ces produits spécifiques. De plus, le carburant flexible couplé avec des moteurs à combustion externe ou des piles à combustible pourrait conduire à une haute efficacité et des émissions très faibles du groupe motopropulseur hybrides-électriques pour les futurs véhicules de transport terrestre [17,18].

La tendance à long terme de l'industrie semble être de vouloir cesser de générer de nouvelles molécules de carburant potentielles au profit du développement de technologies de conversion pour des substituts synthétiques et totalement interchangeables des hydrocarbures classiques dérivés du pétrole (essence, carburéacteur et gazole), ce qui signifie qu'il ne nécessite pas d'adaptation du moteur, du système d'alimentation ou du réseau de distribution de carburant. Il peut être utilisé "tel quel" dans les moteurs actuellement disponibles, que ce soit sous forme pure ou en mélange, en quantité quelconque, avec d'autres types de carburants, de mélanges ou de carburants classiques [19]. Ces carburants interchangeables d'haute-efficacité, et liés à des technologies qui permettront de faibles émissions polluantes, seront nécessaires pour répondre aux besoins de la société en matière de transport, tout en maintenant un air urbain de qualité, face à un monde soumis à des contraintes d'énergie et de carbone. À l'avenir, une combinaison d'approches sera nécessaire : en commençant par les carburants de substitution afin de réduire l'empreinte carbone du véhicule historique mondial en se dirigeant vers une optimisation éventuelle du cycle de vie complet des biocarburants, y compris leurs dispositifs qui les convertissent. Une augmentation des technologies flexibles/adaptables permettra aux consommateurs de passer au carburant disponible le plus propre et / ou le moins cher dans une région donnée à un moment donné, et peut être accompagné d'une augmentation globale de la puissance énergétique du système efficacité par rapport aux véhicules et générateurs d'aujourd'hui [14].

6. Conclusion générale

Le développement du véhicule autonome représente un enjeu considérable pour les politiques de transports et de sécurité, notamment de sécurité routière, et pour l'industrie automobile. Les évolutions technologiques dans ce domaine permettent d'offrir des fonctionnalités de délégation de conduite de plus en plus performantes. Cette course technologique s'accompagne d'un discours de rupture envers les sources d'énergies émettrices de CO_2 impactant négativement notre environnement. L'arrivée de véhicules autonomes n'est pas dissociable des évolutions tendant à des mobilités plus propres, plus accessibles, et plus connectées soutenues par des acteurs publics et privés.

Le véhicule autonome devrait permettre une fluidification du trafic routier, en accroissant considérablement l'efficacité des mesures de régulation dynamique du trafic. Il devrait également impacter fortement la mobilité urbaine. Les principales orientations en faveur de la mobilité propre concernent la maîtrise de la demande de mobilité, le développement des véhicules à faibles émissions de polluants, le développement du marché des carburants alternatifs ainsi que le développement de modes de transports collaboratifs.

Plusieurs leviers sont ainsi disponibles pour favoriser une mobilité autonome propre tels que la régulation de vitesse adaptatif qui permet de maintenir une vitesse constante et de respecter une distance de sécurité avec le véhicule qui précède ; l'écoconduite qui doit garantir une consommation de carburant la plus faible possible, afin de limiter les émissions de gaz à effet de serre; la planification d'itinéraires et enfin la conduite coordonnée et coopérative en convoi permettant de supprimer tous comportement pouvant faire apparaître un "effet accordéon" source de congestion et de pollution.

L'imaginaire autour de la mobilité autonome propre laisse penser que ces derniers seront forcément électriques, ou au moins utilisant des motorisations et/ou carburants alternatifs à la motorisation thermique, moins émettrices en carbone, voire décarbonées (électrique, hydrogène, biogaz). Le moteur thermique a depuis longtemps était privilégié dû à l'abondance d'une énergie fossile bon marché et énergétiquement performante. Mais la protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure imposée par des traités internationaux et des problématiques de santé publiques. Les décisions politiques ainsi que les incitations financières favorisant l'achat de véhicule "propre" ainsi que les contraintes de plus en plus fortes sur les constructeurs, favoriseront à terme l'utilisation de la solution électrique pour le transport autonome, ainsi que l'utilisation de carburants de substitution et l'optimisation de leur cycle de vie complet, y compris les dispositifs qui les convertissent.

7. Références

[1] J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems - SAE International, 2014.

[2] Guide de l'éco-conduite - ADEME – 2017

[3] Jean Michel Contet - Modèle multi-agents réactif pour la navigation multi-véhicules - 2009

[4] Bauduin DAFFLON - Modèle multi-agent d'inspiration physique pour la prise de décision - 2014

[5] Madeleine El Zaher - Approche réactive pour la conduite en convoi des véhicules autonomes : Modélisation et vérification - 2014

[6] Sélim Cornet, Christine Buisson, François Ramond, Paul Bouvarel, Joaquin Rodriguez - Methods for quantitative assessment of passenger flow influence on train dwell time in dense traffic areas - 2018

[7] Florent PERRONNET, Abdeljalil ABBAS-TURKI, and Abdellah EL MOUDNI, Vehicle Routing through Deadlock-Free Policy for Cooperative Traffic Control in a Network of Intersections: Reservation and Congestion - 2014.

[8] Alexandre LOMBARD, Hao XUGUANG, Abdeljalil ABBAS-TURKI, Abdellah EL MOUDNI, Rachid BOUYEKHF, and Florent PERRONNET, V2x for Vehicle Speed Synchronisation at Intersections - 2015.

[9] Odile Chanut, Gilles Paché et Falk Wagenhausen - Logistique urbaine : refonder les logiques d'intermédiation – 2012

[10] Ricardo report for LowCVP on Lifecycle Emissions from Cars

[11] Rapport de mission prospective sur le futur de l'automobile à l'horizon 2030

[12] F. Payri, J.M. Luján, C. Guardiola and B. Pla, Oil \& Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles, Vol. 70 (2015), No. 1

[13] Reitz RD. Directions in internal combustion engine research. Combust Flame 2013;160(1):1–8.

[14] J.M. Bergthorson, M.J.Thomson, A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their imact on existing and futur engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews 42(2015)1393-1417

[15] Nigam PS, Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources. Prog nergy Combust Sci 2011;37:52–68.

[16] Atabani AE, Silitonga AS, Ong HC,Mahlia TMI, Masjuki HH, Badruddin IA, et al. Non-edible vegetable oils: a critical evaluation of oil extraction, fatty acid compositions, biodiesel production, characteristics, engine performance and emissions production. Renew Sustain Energy Rev 2013; 18: 211–45.

[17] Farra N, Tzanetakis T, Thomson MJ. Experimental determination of the efficiency and emissions of a residential microcogeneration system based on a Stirling engine and fueled by diesel and ethanol. Energy Fuels 2012;26:889–900.

[18] Pettersson LJ, Westerholm R. State of the art of multi-fuel reformers for fuel cell vehicles: problem identification and research needs. Int J Hydrog Energy 2001;26:243–64.

[19] Chu S and Majumbar A, Opportunities and challenges for a sustainable energy future, Nature, vol 488, 2012.

8. Biographies



Sidi-Mohammed Senouci est professeur des universités à l'Université de Bourgogne au sein de l'ISAT. Il est aussi directeur du laboratoire de recherche DRIVE. Ses travaux portent principalement sur l'utilisation de méthodes d'optimisation pour l'amélioration de systèmes diverses tels que les systèmes de transport/mobilité et les réseaux de communications sans fil.



Benoîte Lefort est maître de conférences à l'Université de Bourgogne au sein de l'ISAT et est membre du laboratoire de recherche DRIVE. Ses travaux portent principalement sur la chimie de la combustion et la formation des polluants.



El-Hassane Aglzim est maître de conférences HDR à l'Université de Bourgogne au sein de l'école d'ingénieur ISAT et est membre du laboratoire de recherche DRIVE. Il est également directeur du département énergétique et véhicule autonome au sein de l'ISAT. Ses travaux de recherche portent sur l'optimisation énergétique dans les véhicules électriques et hybrides, le smartgrid ainsi que les systèmes pile à combustible.



Pierre ROMET Ingénieur informatique, spécialisé en système embarqué. Après avoir travaillé sur le contrôle haptique d'un piano à queue de concert pour compte du laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies de Paris, il a choisi de porter la thèse SURATRAM au sein du laboratoire Connaissance et Intelligence Artificielle Distribuées.



Franck GECHTER est Maître de Conférences HDR de L'UTBM et membre du laboratoire Connaissance et Intelligence Artificielle Distribuées. Ses travaux portent sur l'utilisation de modèles d'inspirations physique pour l'intelligence artificielle, la résolution distribuée de problèmes et la prise de décision notamment dans le cadre du contrôle de véhicules autonomes.