

Introduction

L'objectif de cette introduction est de montrer et justifier l'intérêt du développement de la conduite sans intervention humaine des véhicules routiers ou aériens. Le concept de la conduite ou pilotage autonome désigne la capacité à circuler ou évoluer dans un trafic sans intervention humaine, et ce en toutes situations.

Pour ce faire, trois aspects fondamentaux sont à considérer pour le développement de l'autonomie : la conservation, voire l'amélioration de la sécurité, l'intérêt économique et sociétal, ainsi que les conséquences indirectes sur les pollutions et les conséquences environnementales.

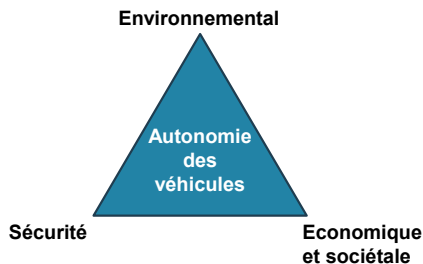


Figure I.1. *Les trois piliers fondamentaux de l'autonomie des véhicules terrestres ou aériens*

D'autre part, certains freins peuvent exister et impacter ce développement tels que l'acceptation par la population des véhicules autonomes dans leur vie quotidienne et les aspects juridiques qui peuvent se poser tels que la responsabilité pénale en cas d'accident.

I.1. L'autonomie vers une amélioration de la sécurité

Un premier intérêt du développement d'un véhicule autonome est d'améliorer la sécurité.

L'automatisme est *a priori* supposé corriger les carences ou les faiblesses du conducteur ou du pilote, et apporter ainsi un supplément de sécurité qui fait défaut aujourd'hui.

Selon l'Observatoire national interministériel de la sécurité routière, le bilan 2021 est de : « 53 540 accidents corporels de la circulation en France métropolitaine. 2 944 personnes sont décédées dans les 30 jours après leur accident, dont 414 piétons, 24 usagers d'engins de déplacement personnel (telles les trottinettes électriques), 227 cyclistes, 96 cyclomotoristes, 572 motocyclistes, 1 414 automobilistes, 103 usagers de véhicules utilitaires, 44 usagers de poids lourds ».

On observe que le nombre de tués par le transport routier est important. En raison des mesures de la sécurité routière en France, le nombre d'accidents baisse ces dernières années, mais reste malgré tout à un niveau trop élevé (voir figures I.2A et I.2B).

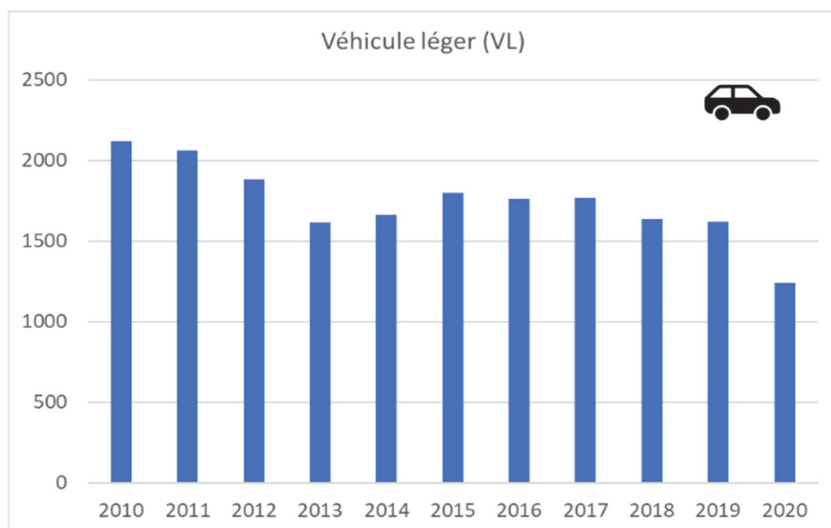


Figure I.2A. Nombre de tués par des accidents de véhicules légers et poids lourds ces 10 dernières années en France

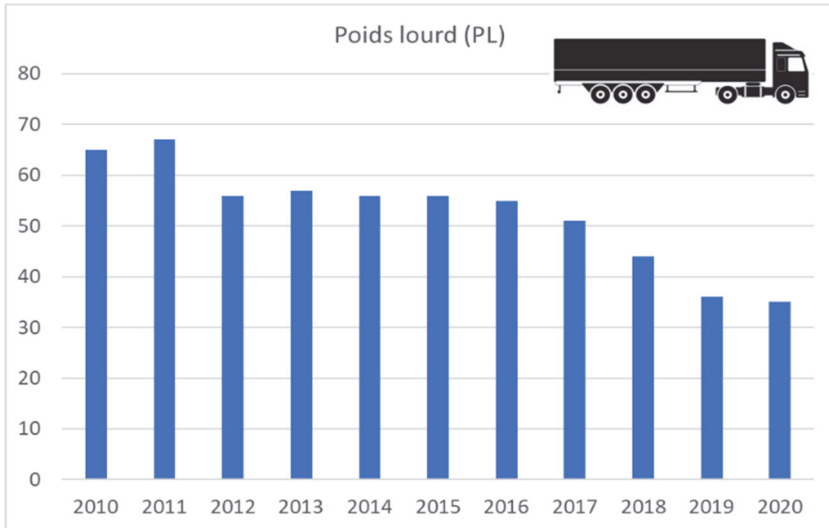


Figure I.2B. *Nombre de tués par des accidents de véhicules légers et poids lourds ces 10 dernières années en France (suite)*

Lorsqu'il s'agit d'accidents de la route, les causes humaines sont statiquement plus importantes que les causes météorologiques ou d'origine technique. Le facteur humain apparaît dans plus de 90 % des accidents corporels de la route, les facteurs météorologiques dans 7 % des cas, et 3 % concernent un véhicule présentant une défaillance technique visible (pneumatiques, éclairage, défectuosité mécanique, etc.). Les causes humaines les plus fréquentes des accidents mortels sont l'alcoolémie et la vitesse (respectivement 31 % et 25 %). Viennent ensuite la fatigue ou la somnolence du conducteur (environ 8 %). Un facteur d'accident de la route est aussi lié à la distraction du conducteur par des éléments extérieurs comme le téléphone. Supprimer ou minimiser l'impact du facteur humain en le supplantant par un système intelligent est un défi important de l'autonomie des véhicules routiers.

Ainsi selon Eurostat, l'automobile est l'un des moyens de transport les moins sûrs si la sécurité est mesurée suivant le critère du nombre de décès par distance parcourue. *A contrario*, malgré l'augmentation forte du trafic aérien (qui double tous les 15 ans ces dernières décennies), la sécurité reste pour ce mode de transport extrêmement élevée. Le nombre d'accidents de vols commerciaux reste très faible vis-à-vis du nombre de vols effectués. Le taux d'accidents mortels dans l'aviation civile n'a cessé de baisser depuis 20 ans dans le monde, alors que le nombre de vols et de passagers a fortement augmenté (plus 50 % de 2005 à 2015).

Selon le décompte du cabinet de conseil néerlandais To70, il y a eu 86 accidents de vols commerciaux dans le monde en 2019, dont 8 qui se sont avérés fatals, faisant 257 victimes. En estimant en 2019 le nombre de vols à environ 45 millions (pour 4,5 milliards de passagers, soit environ 100 passagers par vol), soit 1,27 décollage par seconde, le taux d'accidents est de 1,9 accident par million de vols et un taux de 0,18 accident mortel par million de vols. Cela peut être interprété aussi comme 1 accident mortel pour 5,6 millions de vols. Une personne qui prendrait l'avion 1 fois par semaine, soit 52 vols par an, aurait une probabilité d'un accident mortel tous les 108 175 ans.

Si l'on suppose qu'un vol correspond en moyenne à 3 000 km, cela correspond à l'accident tous les 16,9 milliards de kilomètres, soit 0,06 accident mortel par milliard de kilomètres.

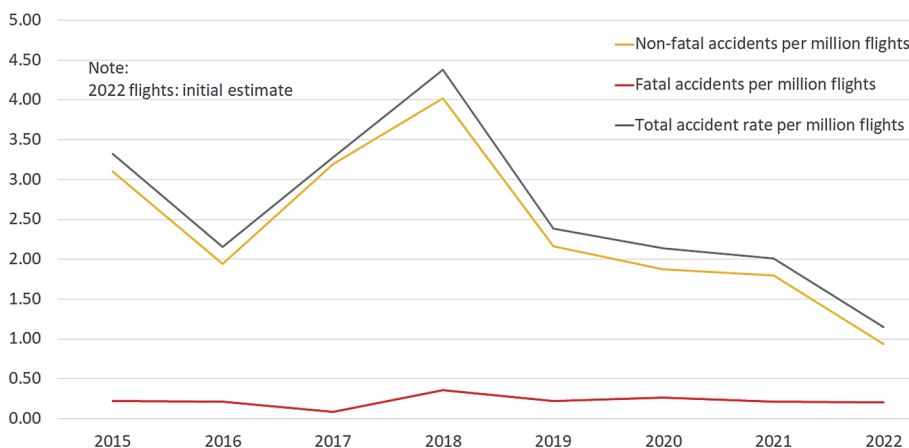


Figure I.3. Évolution du taux d'accidents sur les vols commerciaux 2015-2022
(source : cabinet de conseil To70)

En comparaison, les accidents de la circulation en France sont en 2018 d'environ 3 248 tués en France métropolitaine, soit 5,4 tués par milliard de kilomètres parcourus (Observatoire national interministériel de la sécurité routière).

En supposant qu'il y a en moyenne 2 passagers par trajet, cela représente donc environ 2,7 accidents mortels par milliard de kilomètres par passager en France, dont 50 % associés à des véhicules de tourisme. La répartition est la suivante : 62 % sont sur les routes hors agglomération, 30 % sur autoroute et 8 % en agglomération.

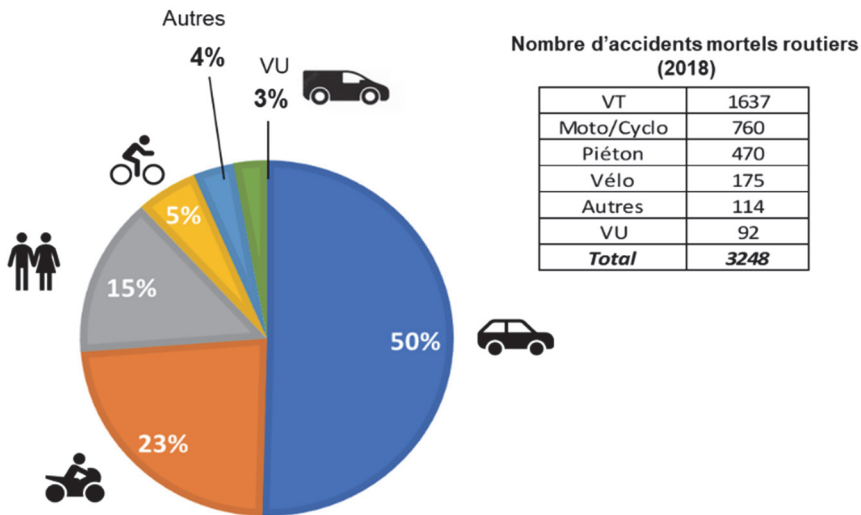


Figure I.4. Répartition des accidents mortels routiers en France en 2018
(source : ONISR)

Il y a donc un rapport de 100 entre le nombre de tués par kilomètre parcouru, entre l’avion et l’automobile en France.

Les statistiques montrent qu’il y a dans le monde 1 chance sur 85 pour être tué lors d’un accident de voiture en tant que conducteur, 1 chance sur 272 d’être tué en étant passager, et 1 chance sur 5 862 lors d’un accident d’avion (étude annuelle du National Safety Council américain).

Comme cela a été évoqué précédemment, le nombre d’accidents des avions commerciaux dans le monde a fortement diminué ces dernières décennies.

La fiabilité des avions de ligne s’est largement améliorée, les catastrophes tiennent de plus en plus à d’autres causes que des pannes de moteurs ou de circuits électriques.

Certains facteurs persistent, les accidents étant souvent d’origine multifactorielle. La plupart des accidents sont la conséquence d’un enchaînement d’évènements variés. Ainsi, les facteurs humains, le terrorisme (même si les statistiques sont compliquées à analyser), les phénomènes météo, les coopérations internationales et les différences culturelles, la formation à améliorer, sont davantage en cause désormais.

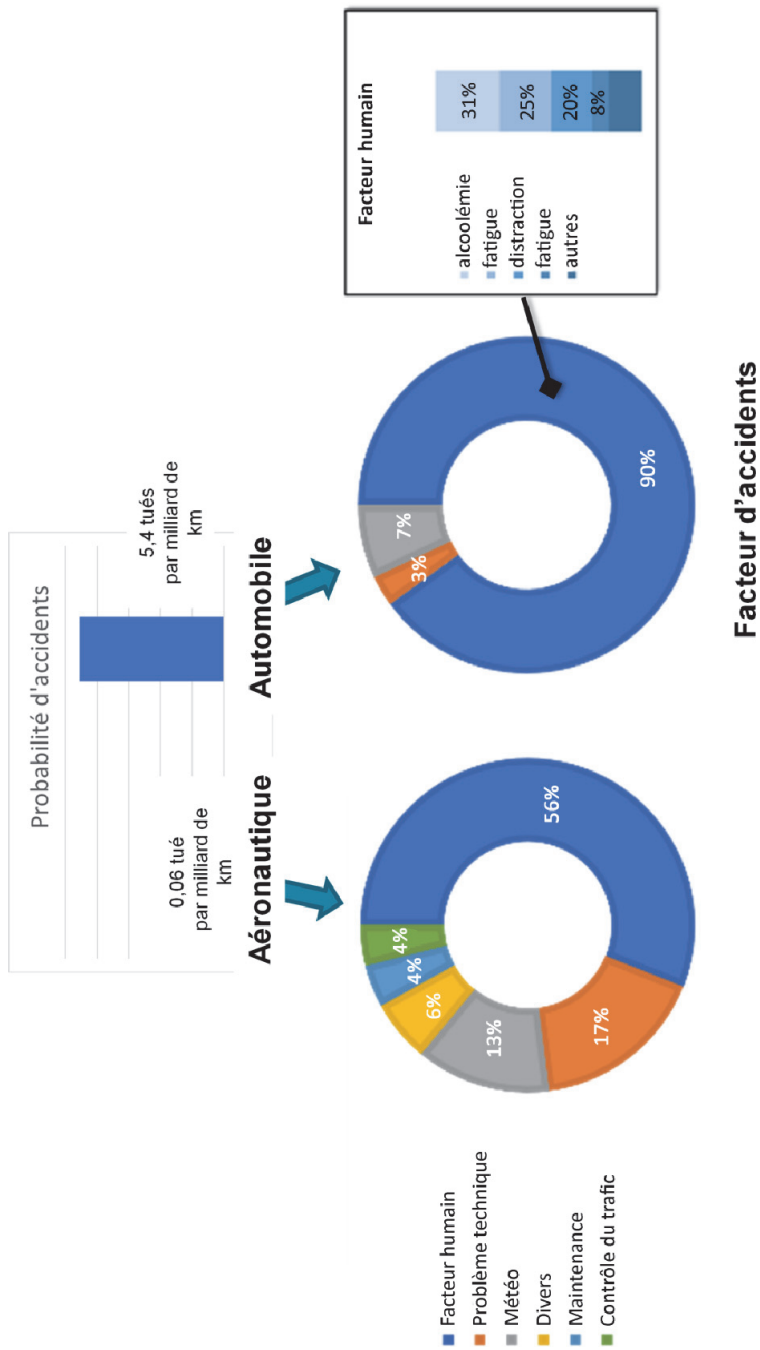


Figure I.5. Facteurs humains dans les accidents du transport aérien de vols commerciaux et de l'automobile

Dans l'aviation commerciale, un peu moins de 60 % des accidents d'avion impliquent une défaillance humaine (source : Boeing 2005). Les types d'erreurs sont multiples, et liés à des causes diverses. Elles peuvent venir directement du comportement du pilote tel que le manque de concentration, la fatigue ou le stress, et en conséquence avoir une réaction inadaptée face à une situation inattendue. Les erreurs peuvent provenir de problèmes techniques de communication entre le pilote et le copilote ou le contrôle aérien. Une préparation et une formation insuffisantes sont aussi des paramètres pouvant augmenter le risque d'accident, tout comme le non-respect des procédures.

Concernant le conducteur ou le pilote que le système autonome doit remplacer, il est à observer que le défi n'est pas du même ordre pour les deux types de transport. Les conducteurs de voitures particulières ne sont pas spécifiquement formés en dehors du passage du permis de conduire. En revanche, les pilotes d'avion suivent des formations plus poussées et de façon régulière.

En termes de sécurité, on peut envisager une sécurité passive d'aide au conducteur ou pilote : des capteurs détectent des problèmes de visibilité comme du brouillard, d'adhérence liée au froid, ou la présence d'individus ou d'objets sur la route, des zones de travaux, et le système envoie alors ces informations au pilote. Des systèmes actuels (eCall, par exemple) détectent un accident et de façon automatique envoient un signal de détresse (au 112, par exemple). Le système peut aussi être déclenché manuellement par le pilote ou un passager.

On peut aussi envisager une sécurité active, en proposant des fonctions d'aide au dépassement et d'évitement de collisions. Le système peut donner des alertes et provoquer le freinage en cas d'obstacle imprévu, ou de non-respect d'un feu à une intersection. Les régulateurs de vitesse adaptatifs coopératifs ou CACC (*Cooperative Adaptive Cruise Control*) font partie des aides développées et proposées [NAS 19].

De même, sont mis en avant des arguments liés au confort : soulagés de la fatigue de la conduite en zone de congestion, les automobilistes, devenus passagers, pourront se reposer, lire, traiter leurs messages électroniques ou se consacrer à des loisirs. Ce surcroît de confort est un élément vital pour le développement du véhicule autonome qui conditionne en partie son acceptation par le public. L'étape suivante de cette révolution est l'automatisation de conduite. C'est le moment où les conducteurs laisseront des programmes informatiques sophistiqués prendre complètement le contrôle du véhicule.

La difficulté technologique de pouvoir assurer un comportement routier en totale sécurité dans la situation de route très complexe reste un défi particulièrement difficile. C'est la raison pour laquelle les applications des voitures autonomes sont possibles dans un environnement très prédictif et dans un endroit où les pertes humaines seraient

minimes si un dysfonctionnement apparaissait. On note ces premières applications dans les magasins de stockages, dans les mines à ciel ouvert où les camions sont confrontés à peu de trafic, et dans la mise en place de navettes sans chauffeur transportant les passagers sur des trajectoires prédéfinies.

L'extension de la conduite à tous les cas d'usage serait possible pour la grande majorité d'utilisations avec probablement 99 % de fiabilité. Il reste ce que l'on appelle les cas limites (*corner cases*) qui peuvent conduire à des conséquences catastrophiques.

Plus particulièrement, les problèmes de fiabilité des logiciels gérant l'autonomie sont liés à la communication non verbale et à la difficulté de reconnaître le même objet dans les situations très variées. Le conducteur communique souvent avec les mains, un sourire et divers gestes pour fluidifier et faciliter le trafic. Ce qui est simple pour un humain est très difficile pour un ordinateur. Un autre problème est celui de la vision artificielle, sujet de recherche depuis 50 ans, dont les résultats aujourd'hui ne sont pas suffisants pour comprendre rapidement la complexité de l'environnement. L'apprentissage profond ou *deep learning* est la nouvelle branche d'intelligence artificielle permettant de classer les images pour pouvoir reconnaître les caractéristiques ou *patterns* en évitant les modélisations mathématiques et en utilisant la reconnaissance des paramètres caractéristiques sur la base de données multiples.

Chaque année, le trafic routier tue 1,2 million de personnes dans le monde. Notre société accepte cette situation. La situation est complètement différente dans l'aviation qui est le moyen de transport le plus sûr. La société ne tolère pas l'accident aéronautique, ce qui oblige les constructeurs à une parfaite maîtrise des technologies, et à imposer des règles très strictes sur la formation des pilotes, la maintenance et le trafic aérien. L'autonomie des voitures devrait permettre de réduire le nombre d'accidents.

Dans l'aéronautique, le taux est presque de zéro. L'autonomie doit maintenir la situation de parfaite sécurité du transport aérien et l'améliorer.

La météo est un élément important pour la sécurité du trafic et particulièrement pour l'aéronautique.

Des conditions météorologiques dégradées peuvent augmenter le risque d'accident routier par manque de visibilité en cas de brouillard ou de forte pluie et des pertes d'adhérence en cas de pluie ou verglas. Néanmoins, ces conditions météorologiques diminuent le trafic contrairement à des conditions agréables qui induisent une augmentation des déplacements. Ils sont alors souvent réalisés avec un objectif de loisirs et associés à des modes de transport accidentogènes tels que la moto ou le vélo. Il est de fait généralement difficile de mesurer l'influence des conditions météo sur la mortalité routière en dehors de conditions extrêmes.

Pour le trafic aérien, la connaissance des conditions météo est d'une grande importance. Atterrir, décoller et voler en toute sécurité dépend essentiellement de l'information météo. Il est estimé que 33 % des accidents aériens ont une cause météorologique. Les causes en sont les fortes pluies, le gel, la foudre, les tempêtes, les turbulences, la faible visibilité et les effets du vent dans certaines configurations de vol.

Historiquement, les premiers vols des pionniers de l'aéronautique étaient réalisés par temps clair. Ils ne disposaient que de peu d'informations, qui étaient portées à leur connaissance lors du briefing préalable au vol.

Les préparatifs du premier vol de l'histoire réalisé en avion motorisé par les frères Wright en 1903 ont nécessité des échanges de données fournies par le Bureau national de météorologie, cela constitue la première relation qu'entretiennent depuis aviateurs et météorologistes. Dans les années 1950, la Convention de Chicago a créé l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) qui a pour fonction d'établir les normes pour le contrôle de la navigation aérienne, de systèmes de navigation et de systèmes de communication. L'annexe 3 de ces normes contient l'aspect météorologie. L'OACI définit pour l'aviation internationale les exigences pour l'aspect météorologique. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) définit la façon de répondre à ces exigences et établit les normes en matière de prestation de services.

Initialement, lors de la préparation d'un vol, un exposé verbal fait par un spécialiste de la météo à l'équipage, permettait de communiquer un minimum d'informations en soulignant si nécessaire les risques prévus lors du vol. Dans un deuxième temps, pour faire des économies et améliorer la fiabilité des données fournies, l'équipage utilise des informations météorologiques mises à disposition sur des serveurs sur le Web.

Dorénavant, les pilotes disposent en temps réel d'un grand nombre d'informations sur la météo avant et durant le vol. Grâce à cette mise à jour permanente, ils ont ainsi des données encore plus fiables et plus complètes pour préparer et exécuter leurs vols.

Toutes les heures, sous forme de codes METAR (chiffrement d'observations météorologiques régulières), il est transmis des observations qui renseignent sur de nombreuses informations utiles associées à la météo : le vent, la visibilité, la température, l'hygrométrie, des phénomènes particuliers entre autres. Selon les données fournies, il peut être choisi de faire passer les conditions de vol à vue vers des conditions de vol aux instruments.

De même, les services nationaux de météorologie des aéroports fournissent des prévisions appelées TAF (*Terminal Aerodrome Forecast*). Celles-ci comprennent les mêmes indications que le METAR, mais fournissent en plus des indications sur la turbulence et le givrage prévus et sur l'évolution des prévisions météorologiques.

Le message SIGMET (*SIGNificant METeorological Information*) est une alerte météorologique pour informer les pilotes lors de phénomènes potentiellement dangereux comme les orages intenses, les turbulences sévères, les cyclones tropicaux, les tempêtes de sable ou les éruptions volcaniques. Ce type de message contient des informations décrivant le phénomène par son intensité, sa position, sa hauteur, sa direction et sa vitesse, mais aussi sa période de validité qui peut aller jusqu'à 4 heures.

En vol, le pilote peut directement fournir un compte rendu météorologique nommé PIREP (*Pilot REPort*). Le message contient les conditions météorologiques dangereuses que le pilote rencontre à un moment précis et à une position donnée. Ce système de message permet d'augmenter la sécurité en apportant des données en temps réel et souvent plus précises que les prévisions basées sur les modèles.

En opposition aux messages PIREP, le système AMDAR (*Aircraft Meteorological Data Relay*) collecte de façon automatisée des données météorologiques en temps réel depuis des avions commerciaux et les transmet automatiquement aux services météorologiques. Les informations communiquées sont la température, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique et dans certains cas l'humidité. Utilisant la flotte d'avions commerciaux nombreux et effectuant régulièrement des vols, le système a une couverture étendue et régulière. Transmis sans l'action du pilote, le risque d'erreur est minimisé, améliorant ainsi les prévisions.

Lors d'un vol à vue ou VFR (*Visual Flight Rules*), des minimums météorologiques ont été définis pour garantir la sécurité du vol. Il doit ainsi s'assurer que la visibilité et la distance aux nuages respectent les minimums requis par la classe de l'espace aérien qui le concerne et les règles de l'aviation civile du pays où il vole. Les classes G, C, D et E font partie de la classification des espaces aériens utilisés en aviation pour assurer la sécurité des vols. La classe G représente les vols près du sol où l'espace aérien n'est pas contrôlé et réservé à des vols à vue simple. Les autres classes représentent des vols où l'espace aérien est contrôlé.

À l'heure actuelle, les données météorologiques sont intégrées par le pilote. Ainsi, les aéronefs sont de plus en plus équipés de technologies permettant de détecter automatiquement les conditions météo (radar météorologique pour repérer les précipitations et éviter les orages et les turbulences, par exemple). Pour les voitures, les détecteurs de pluie, de luminosité, d'humidité dans l'air ou de la mesure de température participent à cette notion de « capteur météo » pour déclencher des essuie-glaces ou le désembuage automatique du pare-brise. L'enjeu du développement des véhicules autonomes sera de les intégrer dans les prises de décisions des algorithmes de contrôles des véhicules avec une bonne fiabilité [CHE 11]. La météo peut avoir un impact sur l'efficacité des caméras et capteurs LiDAR ou de radars servant à la « vision » des véhicules autonomes. Comme un conducteur humain qui connaît souvent la route

qu'il emprunte et modifie ainsi son comportement en fonction de la météo, les véhicules autonomes auront besoin d'avoir ces informations météorologiques en temps réel pour fonctionner.

I.2. Aspects sociétaux et économiques

I.2.1. Aspects sociétaux ou mode de vie

Les conséquences d'une automatisation du transport auront un impact fort sur le modèle urbain et sur les modes de vie. Il existe un engorgement des grandes métropoles, avec probablement des effets indirects sur l'environnement, même si cela est difficile à prédire. Il a été mesuré en 2010, que les zones urbaines étaient constituées de 50 % des habitants de la planète. Les prévisions estiment cette population à 75 % en 2050.

Certaines thèses soutiennent que l'autonomie des véhicules va régler une partie des problèmes d'embouteillage, d'autres au contraire annoncent que cela va favoriser l'étalement urbain.

On peut ainsi imaginer l'optimisation des temps de trajet avec des données reçues par le véhicule pour tenir compte de l'état de la circulation de manière dynamique pour éviter les zones de trafic par exemple, avoir une meilleure fluidité d'un trafic urbain par une gestion optimale des feux [BIZ 14, NAS 19].

Il sera désormais possible de créer des cartes locales dynamiques en partageant les informations collectées par chaque véhicule, ce qui permet d'améliorer la fluidité de la circulation et permet également de s'adapter à des changements que le véhicule peut rencontrer comme l'adaptation de la vitesse en cas de changement de signalisation à cause de travaux. Le système est ainsi considéré comme une aide à la conduite, mais une optimisation énergétique de la conduite pourrait y être rajoutée.

Les véhicules autonomes vont proposer de nouveaux systèmes de transport pour mieux satisfaire les besoins et les pratiques actuelles. Mais il peut être imaginé que ces pratiques elles-mêmes vont être transformées, car cela va modifier nos modes de vie en modifiant l'organisation de nos activités, les conditions d'accessibilité aux emplois, aux commerces ou aux services.

Aujourd'hui, 75 % des Français prennent le volant pour aller au travail, selon une étude Ipsos, mais la même étude montre que 64 % des Parisiens et 58 % des banlieusards de la petite couronne utilisent les transports en commun, alors que le taux tombe à 8 % dans les villes de province (voir figure I.6).

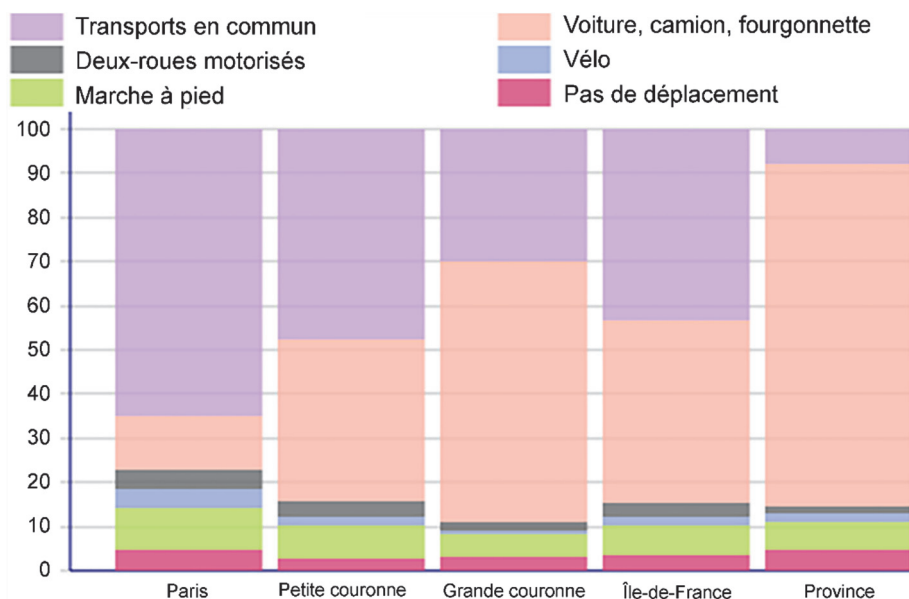


Figure I.6. Répartition en % des modes de transport routier en Île-de-France et en Province par les actifs en emploi

I.2.2. Aspect économique (baisse des coûts, business case)

Le véhicule autonome peut être une opportunité économique pour l'industrie automobile ou aéronautique.

Le coût des accidents de voiture a un impact fort sur l'économie. Ainsi en France et en 2016, le coût des accidents de la route est d'un niveau proche de 2,2 % du PIB. Il a ainsi été dépensé 38,3 milliards d'euros suite à des accidents corporels selon un rapport de l'Observatoire national interministériel de la sécurité routière (ONISR). L'ensemble de ces coûts englobe les frais médicaux et sociaux, les premiers secours, la période de convalescence, etc. Mais ils tiennent compte aussi des coûts matériels des véhicules, et des frais d'expertise et de justice tout comme les coûts liés à la mortalité.

Ces accidents sont aussi un manque à gagner considérable pour les entreprises. Par exemple, les études estiment en 2014 que 10-15 % des tués effectuaient un trajet lié au travail. Les accidents liés au transport routier quantifient 4 520 personnes hospitalisées et 483 personnes tuées. Cela correspond à 5 855 070 journées de travail perdues pour les entreprises.

Les impacts de l'automatisation sur l'économie des transports restent très imprécis avec beaucoup d'incertitude. Se pose ainsi la question des modèles économiques, avec une redistribution des pratiques : véhicule individuel ou partagé ? Comment ces véhicules autonomes vont-ils s'intégrer aux systèmes actuels de transport public par exemple ?

Le véhicule autonome va être l'occasion d'augmenter la capacité à travailler ensemble de ceux qui fabriquent le véhicule, ceux qui opèrent la mobilité et ceux qui détiennent l'actif et l'espace dans lequel les véhicules évoluent (ville, région, etc.). Y aura-t-il un regroupement des fonctions ? Aura-t-on affaire à deux ou trois acteurs ? C'est l'un des gros enjeux économiques des années à venir.

Pour les constructeurs, la notion de la gestion de la mobilité se pose, l'ambition pour étendre leur chaîne de valeur serait de pouvoir maîtriser la production des véhicules et pouvoir opérer la mobilité une fois le véhicule sur la route. Cela nécessite de gérer les compromis entre les aspects technologiques, les questions sociétales et la notion de *business model*. Il est nécessaire de proposer des services qui améliorent la vie quotidienne tout en étant rentables. Les enjeux sont ainsi de trouver le bon mode de fonctionnement incluant les collectivités pour co-construire une nouvelle forme de mobilité.

Les usages comme les nouveaux services restent à inventer. Le transport en commun comme les taxis ou les navettes sont l'objet des principaux tests effectués actuellement à travers le monde. Le développement de la mobilité autonome individuelle, concernant plutôt les particuliers, où l'on peut imaginer de nouveaux services à bord de voitures où l'on ne conduira pratiquement plus, nécessite la maîtrise du transport en commun autonome. Il peut être imaginé que lorsque le degré d'autonomie sera suffisant, l'utilisateur des véhicules autonomes pourra se focaliser sur d'autres activités que la conduite telles que les loisirs, le repas, le travail, etc.

Depuis toujours, un constructeur conçoit, fabrique et vend la voiture. Aujourd'hui, il la finance et l'entretient. Il est impératif pour les constructeurs d'innover en proposant de nouveaux services complémentaires afin de diversifier leurs sources de revenus [BÖS 18].

De plus, certains véhicules génèrent actuellement jusqu'à plusieurs dizaines de gigaoctets de données par jour qui ne sont pas entièrement exploitées. La gestion directe ou indirecte des données sera une source potentielle de revenus.

Pour être rentable, un véhicule autonome devra faire beaucoup de kilomètres et transporter plusieurs personnes à la fois. Le transport en commun a des trajets connus,

et balisés, qui limitent le niveau d'incertitude rencontré sur la route par le trafic, mais au prix d'une souplesse limitée.

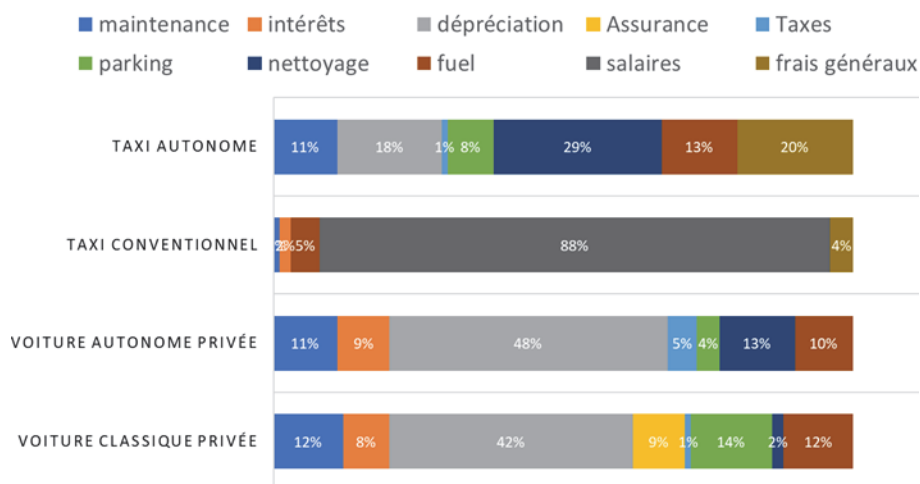


Figure 1.7. Comparaison des coûts suivant l'usage d'un véhicule

Sur le marché du véhicule individuel, on peut imaginer deux types de propositions. En premier lieu les voitures sans chauffeur, type robot-taxis. Dans ce cas, un marché sera établi, cependant les acheteurs seront des professionnels de la mobilité tels que les opérateurs et les gestionnaires de flottes, et non des particuliers [BIS 05].

Il est envisageable qu'un marché des véhicules autonomes avec chauffeur soit mis en place, offrant la possibilité de choisir entre conduire soi-même ou opter pour l'autonomie en cas d'envie ou de nécessité. Au début, cette fonctionnalité sera probablement disponible uniquement pour les modèles de véhicule haut de gamme.

Le développement et la mise au point de la partie logicielle demandent des investissements de plus en plus importants, on peut imaginer que dans un futur proche le coût des logiciels nécessaires aux véhicules autonomes représentera une part importante de la valeur du véhicule. L'introduction de véhicules connectés dans le parc automobile amène à une révolution importante pour les constructeurs comme pour les équipementiers.

L'introduction de la partie logicielle dans les véhicules autonomes n'a pas seulement une incidence sur la conception. Lors de l'usage, la partie *software* pourra être mise à jour en permanence directement *on line*, comme l'a déjà proposé le constructeur

Tesla. De fait, la frontière entre véhicule neuf et véhicule d'occasion s'estompe, avec certainement des conséquences sur le marché de l'automobile.

De plus, de nouvelles sociétés spécialisées dans les véhicules électriques autonomes se développent, qui proposent des voitures ou des aéronefs sans avoir besoin d'investissements importants en utilisant des modules achetés auprès de différents équipementiers. Les grandes entreprises du numérique telles que Google, Apple ou Uber aspirent à s'imposer sur le marché de la voiture autonome, chacune avec son propre modèle économique. Google, à travers sa filiale Waymo, va offrir aux industriels un système de gestion autonome. Il semble qu'Apple se focalise sur le domaine du « système d'exploitation, du design et de l'interface », c'est-à-dire sur son expertise en tant qu'intégrateur. Quant à l'entreprise Uber, elle aurait la possibilité de superviser des flottes de camions et de voitures robots [NAS 19].

Le développement du véhicule autonome nécessite la mise en place croissante d'alliances entre les opérateurs, les constructeurs et les organismes de recherche publics et privés. À titre d'exemple, Renault a proposé un projet de robot-taxis qui vise à développer des services de mobilité autonome, électrique et partagée, adaptés aux environnements urbains. Ils ont ainsi développé un partenariat stratégique avec des partenaires industriels comme Transdev, groupe français multinational spécialisé dans le transport public et présent dans 19 pays. De même, on peut citer General Motors (GM) qui a acquis Cruise Automation une start-up américaine spécialisée dans la technologie des véhicules autonomes et reconnue pour ses systèmes logiciels et matériels, pour renforcer ses capacités et son expertise technologique.

De même, l'entreprise Here, spécialisée dans les services de cartographie et de localisation, a été rachetée par le consortium allemand BMW, Audi et Daimler, élargi plus tard à d'autres partenaires du secteur automobile comme Bosch ou Continental. Ces investissements stratégiques visent à renforcer les capacités de ces constructeurs pour le développement des véhicules autonomes, la société Here étant devenue un acteur majeur dans le domaine des services de cartographie numérique, fournissant des solutions essentielles pour les systèmes de navigation. Tesla a racheté DeepScale, une entreprise spécialisée dans la vision par ordinateur, pour renforcer son expertise en matière de conduite autonome. Dernièrement, aiMotive, une société spécialisée dans les technologies de conduite autonome a été acquise par Stellantis, pour développer ses solutions de mobilité autonome. Plusieurs entreprises du numérique ont aussi investi dans le domaine des véhicules autonomes. Ainsi, Google Car a créé des partenariats avec Fiat-Chrysler et Honda. Apple a investi dans Didi Chuxing la plateforme chinoise de VTC. Uber a racheté la société Otto, qui transforme des camions en véhicules autonomes. Nvidia a acquis la start-up DeepMap, spécialisée dans la cartographie haute définition, afin d'améliorer ses solutions pour les véhicules autonomes.

Pour l'aéronautique, le gain économique est lié à l'augmentation de la sécurité et les coûts qui y sont liés, à la diminution du besoin de formation des pilotes et à l'optimisation du coût des équipages.

I.3. Aspects amélioration de la pollution

La question de l'impact environnemental des véhicules autonomes peut être posée aussi bien pour l'automobile que l'aéronautique.

Cet impact reste difficile à quantifier et incertain en raison de différents paramètres. Une étude ministérielle a montré que les automobiles autonomes pourraient réduire la consommation de carburant des voitures particulières jusqu'à 90 %, ou l'augmenter de plus de 200 % en fonction des hypothèses émises.

On peut imaginer que l'automatisation des automobiles puisse optimiser la consommation et la pollution grâce à la capacité à gérer un vol ou un trajet. De plus, cette automatisation des véhicules s'accompagne d'un changement des modes énergétiques de propulsion (électrification *versus* moteurs thermiques). Sur ces considérations, l'on peut projeter que globalement la pollution, émission de CO₂ ou de particules, devrait être en diminution. La gestion du trafic permettra de faire circuler en convoi les véhicules pour tirer parti de l'aérodynamique et diminuer ainsi la consommation. La technique dite *platooning* est déjà envisagée pour les convois de camions.

Les camions suiveurs, sous couvert d'un système de pilotage automatique qui garantisse la sécurité, sont maintenus à faible distance des camions qui les précèdent pour bénéficier de l'aspiration aérodynamique.

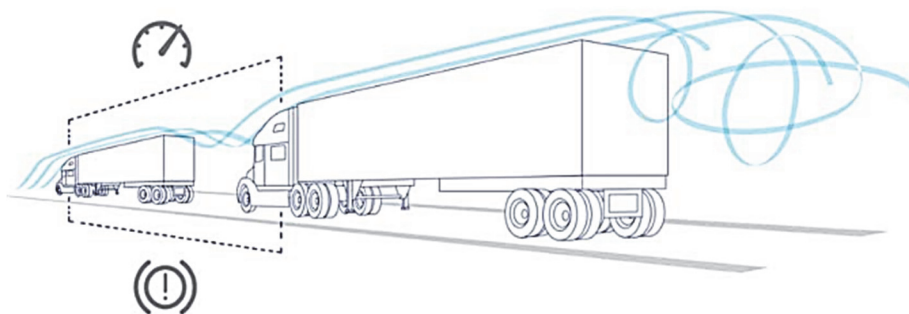


Figure I.8. Technique de platooning pour les camions
(source : B. Jacob, JTR 2017)

L'automatisation des véhicules peut aussi amener à alléger les automobiles en supprimant ou diminuant la masse de certains organes (taille du réservoir ou des batteries électriques par exemple) et ainsi gagner de la consommation supplémentaire par un effet vertueux.

A contrario, on peut s'attendre à ce que le trafic augmente (mesuré par le nombre moyen de kilomètres parcourus pour un véhicule donné). On peut imaginer, s'il n'y a pas d'analyse économique adaptée, que les véhicules en partage fassent des kilomètres à vide pour aller d'un utilisateur à l'autre, ou que les usagers fassent tourner des véhicules à vide plutôt que de payer un stationnement.

Les limites habituelles d'un conducteur, la fatigue ou l'âge par exemple, n'existeront plus, et les propriétaires de véhicules pourront ainsi voyager plus fréquemment et plus loin. Ils pourraient imaginer faire plus d'heures de transport domicile-travail en exploitant mieux le temps passé dans le véhicule (dormir, travailler, faire des loisirs, etc.).

Cet impact est majeur sur la réussite du passage aux véhicules autonomes.

La réglementation représente le moyen évident de se protéger contre les inconvénients environnementaux potentiels des véhicules automatisés. Les institutions pourraient exiger que les voitures prennent l'itinéraire le plus efficace, ou même pousser les consommateurs à s'éloigner de la possession d'une voiture privée pour se tourner vers le covoiturage et empêcher certaines dérives.

Pour l'aéronautique, on peut retrouver des similitudes.

C'est le cas du vol en formation ou en essaim. En s'inspirant du vol en formation des oies sauvages, il a été imaginé de nouvelles techniques de vol capables de générer des économies importantes de carburant [MAR 21]. En effet, certaines espèces d'oiseaux migrateurs dont les oies sauvages ou les pélicans volent en formation en V renversé pour optimiser leur efficacité énergétique et faciliter leur déplacement sur de longues distances. L'oiseau leader placé au sommet du V crée des tourbillons par le battement de ses ailes qui facilitent la pénétration dans l'air de chaque oiseau qui le suit et bénéficie ainsi d'une portance accrue.

Airbus analyse la possibilité de transposer cette technique de formation en V aux vols des avions commerciaux sur de longues distances. En maîtrisant la coordination extrêmement précise entre les avions, les appareils suiveurs placés dans le sillage des ailes de leader maintiendraient la même vitesse en réduisant la puissance de leur moteur. Le projet « Fello'fly » d'Airbus a estimé à travers des tests et des simulations que

l'économie de carburant serait de l'ordre de 5 à 10 % par vol en formation en V si les appareils maintiennent une distance de séparation de 3 km.

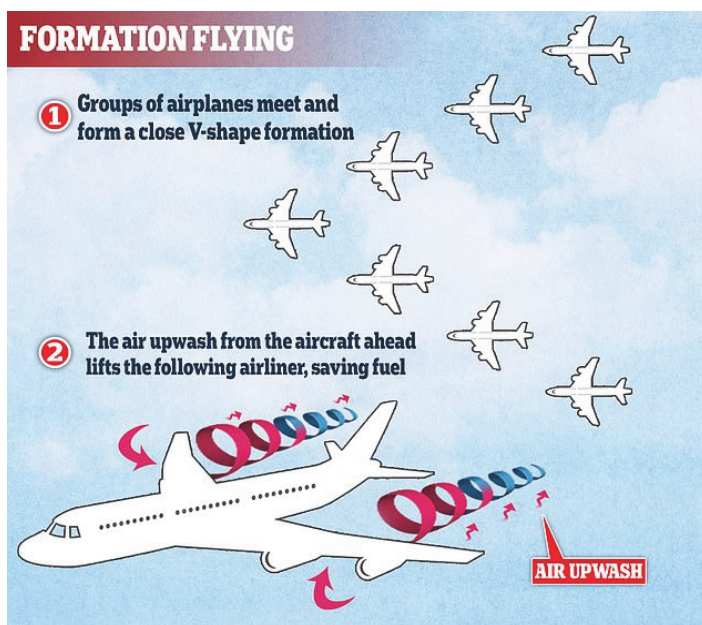


Figure I.9. Formation Flying (Fello'Fly project – Airbus)

Pour les vols de longue durée comme les vols transcontinentaux, les formations en V sur une flotte d'avions commerciaux peuvent offrir un avantage aérodynamique pour les avions suiveurs et donc générer une économie de carburant globale relativement intéressante. Cette stratégie demandera techniquement une simple mise à jour des calculateurs des avions, mais il existe des limitations réglementaires. En effet, la réglementation actuelle impose des distances de séparation minimales pour des raisons de sécurité. La pratique actuelle préconisée par Airbus obligeant les avions à voler à une distance supérieure aux 3 km n'optimise pas ce type de vol en formation. Il y a aussi une certaine complexité pratique de coordination pour maintenir une formation en V de plusieurs avions commerciaux sur de longues distances d'autant plus que les vols commerciaux sont actuellement opérés de façon indépendante par différentes compagnies aériennes. Des études menées par Airbus et des institutions académiques ont montré des résultats prometteurs, mais des défis importants restent à surmonter avant de pouvoir les appliquer aux opérations commerciales à grande échelle en raison des limitations réglementaires et de la complexité de coordination.

I.4. Aspects acceptation et éthique

I.4.1. Acceptation

Par définition, « l'étude de l'acceptabilité d'une technologie est l'étude des représentations sociales subjectives à son endroit qui rendent l'objet technologique attrayant, utile, voire indispensable pour les utilisateurs » [BOB 09].

D'une façon générale, l'acceptabilité d'un technovéhicule autonome est associée à l'intention d'utiliser cette technologie. Elle inclut des notions de performance pour une utilisation au travail ou dans sa vie quotidienne, la notion d'accessibilité ou facilité à utiliser la technologie et l'image sociale que peut renvoyer son entourage proche sur son utilisation.

Les critères d'acceptabilité sont nombreux et complexes. On peut citer : ne doit pas altérer les libertés de déplacement, doit assurer une fiabilité et une sécurité égales à celles de la voiture personnelle, doit avoir un impact positif sur leur environnement, un coût monétaire égal ou moindre, et doit permettre un gain de temps.

Les futurs usagers peuvent aussi y voir des opportunités telles qu'utiliser plusieurs types de véhicules en fonction du besoin, gagner sur l'espace de stationnement pour l'affecter à un autre usage, etc.

On peut aussi recenser différents types de réticences telles que des difficultés d'organisation comme ne plus posséder de voiture personnelle pour s'en servir dès que l'on en a le besoin.

À ce jour, certains conducteurs considèrent que la technologie n'est pas encore assez fiable et ont donc peur d'un risque de dysfonctionnement d'une fonction du véhicule autonome. L'acceptabilité du conducteur est aussi dépendante de la phase potentielle de conduite autonome, ainsi le conducteur est plus enclin à déléguer le contrôle du véhicule sur les autoroutes, dans les zones à forts embouteillages ou lors d'une manœuvre de stationnement.

L'acceptabilité se fera sans doute par étapes, en passant d'abord par une étape d'automatisation de certaines tâches. L'utilisateur éprouve la technologie par l'expérience.

Actuellement, certains véhicules proposent déjà des fonctions d'assistance appréciées par les conducteurs telles que le freinage automatique en cas de détection d'obstacles devant la voiture, l'alerte en cas de tentative de changement de file alors qu'un

véhicule se trouve dans un angle mort. L'étape finale de l'autonomie totale pourrait être acceptée grâce à cette expérience positive qui va se poursuivre largement dans les prochaines années.

1.4.2. Éthique

La notion d'éthique dans le transport et le débat que cela génère existaient déjà bien avant que les voitures autonomes ne commencent à être développées. Ainsi en 1967, la philosophe Philippa Foot a utilisé l'exemple du dilemme du tramway pour explorer les concepts comme le bien commun, le sacrifice et les conséquences des actions. Le dilemme moral proposé est le suivant : un tramway est lancé à pleine vitesse sur une voie de chemin de fer. Sur cette voie, cinq personnes sont attachées et ne peuvent pas bouger. Vous avez la possibilité, grâce à un levier, de dévier le tramway vers une autre voie où se trouve une seule personne attachée. Quelle décision prendre ? Ce dilemme philosophique permet d'identifier au moins deux aspects éthiques du dilemme. L'éthique utilitariste qui consiste à minimiser le nombre de morts et l'éthique déontologique basée sur la règle morale (il ne faut pas intervenir). Le problème se pose pour la voiture autonome ou pour la programmation des intelligences artificielles [DOD 21].

En 2016, des chercheurs du CNRS (membres de TSE – Université Toulouse Capitole), du MIT, de l'Université Harvard et de l'Université de la Colombie-Britannique ont lancé la plateforme en ligne « Moral Machine » pour interroger les utilisateurs sur les dilemmes moraux auxquels la population est confrontée lors du développement de véhicules autonomes. Les chercheurs ont recueilli 40 millions de décisions de millions d'internautes à travers le monde. Les résultats montrent des préférences morales mondiales qui pourraient guider les décideurs et les entreprises à l'avenir. L'analyse de ces données a été publiée dans *Nature* le 24 octobre 2018.

Selon l'enquête, la voiture autonome doit faire un choix clair dans différents cas de figure. Les participants ont par exemple choisi ces scénarios : un être humain doit être épargné face à un animal, un jeune doit être épargné face à un être humain plus âgé et un groupe doit être épargné face à un individu. D'autres critères ont été soulevés, comme le respect du Code de la route, le statut social, l'état physique de l'individu (en surpoids ou en forme), et le genre (homme/femme).

Il y a un flou juridique actuellement sur cette question. L'Allemagne a initié une réglementation en 2017 en s'appuyant sur les trois critères principaux cités précédemment, à savoir, prioriser le fait de sauver un être humain, un jeune, un groupe.

I.5. Aspect juridique

La question qui se pose est quelle est la responsabilité juridique en cas d'accident ? Est-ce le conducteur, le fabricant ou l'exploitant ? Quel sera le rôle des assureurs ? La législation actuelle est-elle à modifier ? [HAU 17].

Lorsque le système de conduite automatisé est activé et contrôle le véhicule conformément à ses conditions d'utilisation, le conducteur n'est pas tenu pénalement responsable des infractions résultant des manœuvres du véhicule. Il est tenu de rester vigilant et doit être prêt à reprendre le contrôle lorsque le système lui demande, s'il y a injonction des forces de l'ordre ou la nécessité de donner la priorité aux véhicules d'urgence. S'il y a défaillance avérée du système de conduite automatisé, c'est le constructeur qui en est tenu responsable. Pour les taxis autonomes où il y a un usage commercial du véhicule, l'exploitant peut être tenu responsable s'il y a un manque d'entretien avéré et que le véhicule n'est pas utilisé avec les règles de sécurité et les conditions d'utilisation.

La question du besoin du permis B actuel, à savoir : est-il toujours utile ou sera-t-il nécessaire d'établir un nouveau permis spécifique associé aux véhicules autonomes ?

Les règles actuelles associées au Code de la route doivent aussi être remises en cause, analysées ou modifiées. Un conducteur en état d'ébriété ou de fatigue avancée peut-il utiliser un véhicule autonome ? Est-il nécessaire d'imposer aux utilisateurs de véhicules autonomes de connaître les caractéristiques techniques du véhicule pour être suffisamment compétents afin de détecter des dysfonctionnements ou des anomalies avant son utilisation ? Est-il nécessaire de connaître les nouvelles technologies des véhicules autonomes pour garantir le respect du Code la route ?

Le conducteur est passé d'un véhicule 100 % maîtrisé à un véhicule autonome en appuyant sur une évolution rapide et forte des technologies. Ces évolutions concernent aussi bien les performances des technologies notamment par l'introduction des caméras, des LiDAR, des radars, et de calculateurs de plus en plus puissants. Cette évolution a aussi nécessité d'améliorer le niveau de fiabilité de tous les composants de toute la chaîne de commande du véhicule autonome, des capteurs aux actionneurs.

Ces évolutions sont exposées dans le chapitre 1.