



HAL
open science

Véhicules autonomes en situation de service : modèle systémique et application aux expérimentations du programme EVRA

Fabien Leurent

► **To cite this version:**

Fabien Leurent. Véhicules autonomes en situation de service : modèle systémique et application aux expérimentations du programme EVRA. 2020. hal-02460977

HAL Id: hal-02460977

<https://hal.science/hal-02460977>

Preprint submitted on 30 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Véhicules autonomes en situation de service : modèle systémique et application aux expérimentations du programme EVRA

Fabien Laurent, Ecole des Ponts ParisTech

Résumé

La délégation de conduite des véhicules automobiles constitue actuellement un grand challenge technologique. Constructeurs et géants du digital rivalisent en démonstrations de parcours à conduite autonome, en annonces et en promesses. Les autorités publiques sont attentives à la sécurité de tous les usagers de la route et à l'acceptabilité par la population de la circulation de véhicules sans conducteur et même sans personne à bord.

En France, l'ADEME a lancé en 2019 le programme EVRA, pour « Expérimentations de Véhicules Routiers Autonomes ». Deux consortiums, ENA et SAM, sont engagés dans un ensemble d'expérimentations et dans leur évaluation en termes de sécurité et d'acceptabilité (par les utilisateurs, les autres usagers de la voirie et les riverains), et plus largement d'impacts potentiels pour la société, l'économie et l'environnement.

Cet article s'intéresse aux Services de Mobilité Autonome (SMA), on pourrait dire aussi "Autonomous Vehicle as a Service". Quels services peuvent être rendus à quels utilisateurs ? A quels besoins de mobilité s'adressent-ils ? Dans quelles situations de territoire ? Avec quelle qualité de service, selon quelles conditions d'exploitation, selon quels protocoles de services ?

Nous apportons des réponses de deux types. D'une part, nous proposons un modèle systémique pour comprendre un service de mobilité autonome comme une variante du mode de transport automobile : nous explicitons en quoi la délégation de conduite transforme les relations entre les sous-systèmes Véhicule, Usager, Infrastructure et Protocoles de service. L'analyse débouche sur une "matrice de caractérisation" applicable à tout service de mobilité autonome.

D'autre part, nous appliquons cette matrice afin de caractériser les services expérimentés dans le programme EVRA, rangés ici en cinq familles : (1) Délégation de conduite sur réseau magistral, (2) Valet de parking, (3) Livraisons urbaines par robot de fret, (4) Circuit de navettes de voyageurs en milieu rural, (5) Lignes de navettes de voyageurs en milieu urbanisé.

Nous en tirons une synthèse d'ensemble ainsi que des recommandations à l'intention des promoteurs de services et des acteurs sociaux intéressés au potentiel des SMA pour leur territoire.

1. Introduction

1.1 Contexte

Il existe déjà des formes de véhicules à conduite autonome, capables de se déplacer sans conducteur humain : non seulement des animaux domestiques (Yves Krattinger cite le cheval

et sa carriole), mais surtout des métros automatiques et des systèmes de Personal Rapid Transit sur des parcours fixes en milieu fermé.

Depuis une décennie, le front de l'innovation technologique se concentre sur la conduite autonome pour des véhicules automobiles destinés à utiliser les réseaux routiers pour y circuler sur des parcours diversifiés, et ce dans des conditions variées de trafic, en interaction avec d'autres véhicules et avec l'ensemble des usagers de la voirie. L'Association internationale des ingénieurs automobiles a défini une échelle à 5 niveaux (levels) pour la délégation de conduite : à partir du niveau zéro (L0) sans aucune intervention du système de conduite, ce sont (L1) « l'assistance à la conduite » par diverses fonctions élémentaires, (L2) « l'automatisation partielle » dont le conducteur reste superviseur (assistant de conduite en embouteillage, ou de parking), (L3) « l'automatisation sous condition », qui doit reconnaître ses limites d'utilisation et telle que le conducteur doit être capable de reprendre les commandes (ex. pilotage sur autoroute), (L4) « l'automatisation élevée » permettant la conduite autonome dans un contexte limité et/ou une situation prédéfinie, (L5) « l'automatisation totale » permettant la conduite avec ou sans occupants à bord.

Les industriels du secteur automobile multiplient les annonces pour impressionner le grand public. Waymo, filiale de Google, a montré des parcours de plus en plus longs et a créé en 2018 un service de taxis à conduite autonome dans la ville de Phoenix en Arizona : ce service est proposé sans personnel à bord depuis l'été 2019 à un groupe de clients qui ont souscrit un engagement spécial ⁽¹⁾. Les grandes compagnies modernes de transport à la demande sont très mobilisées – l'accident mortel d'un taxi Uber en mars 2018 a suspendu provisoirement certaines expérimentations, mais pas les développements technologiques. Le constructeur d'automobiles électriques Tesla communique allégrement sur sa fonction Autopilot, annoncée capable de tout par Elon Musk, mais fin 2019 elle semble avoir atteint au plus le niveau L4. Les constructeurs traditionnels prennent aussi position : notamment Ford et Nissan, Renault et PSA, Daimler et Volkswagen, ainsi que les grands équipementiers, Delphi, Bosch, Valeo en tête. Les navettes autonomes destinées au milieu urbain constituent au moins une niche de marché, sur laquelle sont en pointe deux sociétés d'origine française, Navya et Easymile.

Les opérateurs d'infrastructures se préparent progressivement : pour automatiser des véhicules utilitaires dans les aéroports, et surtout pour accueillir des véhicules autonomes sur les routes. Tant les services de taxis que les navettes, ou encore la perspective d'automatiser les autobus, motivent un très fort intérêt des opérateurs du transport public de voyageurs : en particulier Transdev, Kéolis et la RATP en France et à l'international.

1.2 Objectif

Au-delà des effets d'annonce et d'image, quelle est la signification profonde de la conduite autonome pour l'automobile, en tant que mode de transport ? L'échelle des niveaux de délégation concerne prioritairement le véhicule, ainsi que l'infrastructure support en tant que lieu de circulation. Plus largement, la délégation de conduite remet en question toutes

¹ Hawkins A.J. (2019, Aug.26) Waymo's robot taxi service is improving, but riders still have complaints. <https://www.theverge.com/2019/8/26/20833215/waymo-self-driving-car-taxi-passenger-feedback-review>

les règles d'utilisation et protocoles de service qui font du mode automobile un système technique et même sociotechnique (²).

Pour nous, la question primordiale concerne la nature du service rendu, sa qualité pour les utilisateurs. Dans cet article, nous présentons un modèle qualitatif destiné à analyser et comprendre le mode automobile de manière générale et la conduite autonome de manière particulière. Ce modèle abstrait est donc un référentiel pour l'analyse. Le mode automobile y est modélisé comme un système complexe qui articule quatre sous-systèmes qui concernent respectivement le véhicule, l'infrastructure, les protocoles et l'utilisateur. Nous signalerons les caractéristiques fondamentales de ces systèmes et nous mettrons en évidence les relations entre les sous-systèmes – relations bilatérales ou multilatérales.

Nous appliquerons ce modèle pour analyser les services de mobilité basés sur des véhicules autonomes qui sont soumis à expérimentation dans le programme EVRA de l'ADEME : EVRA pour Expérimentations de Véhicules Routiers Autonomes. Dans ce cadre, deux consortiums respectivement SAM et ENA, ont été retenus en avril 2019 afin d'explorer des potentialités de services dans une diversité de situations en France : circuit de navettes en zone rurale (ENA), lignes de navettes en milieu urbanisé (SAM et ENA), délégation de conduite sur réseau de type autoroutier (SAM), parking public (SAM) et livraisons urbaines de fret (SAM). Pour chacune de ces cinq familles de solutions, nous appliquerons une grille d'analyse à neuf rubriques : consistance du service, qualité de service, commercialisation, constitution physique, production de service, économie du service, impact social, impact environnemental, aspect institutionnel.

1.3 Méthode

Notre modèle qualitatif repose sur une analyse technique et systémique, distinguant des sous-systèmes et explicitant leurs relations. Les sous-systèmes du système Service comprennent le véhicule, l'infrastructure, les protocoles (offre de service, conditions d'usage et logistique interne du service), ainsi que les usagers. L'environnement du système comprend les fournisseurs, les « autres » usagers / opérateurs / infrastructures de la mobilité multimodale dans le territoire, les riverains, la puissance publique et l'environnement.

La déclinaison du modèle en une matrice d'analyse permet de caractériser un système-service : à dégager les caractéristiques essentielles, les points saillants qui méritent une attention particulière à la fois dans l'expérimentation et dans l'évaluation pour en tirer des leçons.

1.4 Structure de l'article

La suite de l'article est organisée en 5 parties. La section 2 présente le modèle systémique du mode automobile, système sociotechnique associant véhicule, infrastructure, services (protocoles) et usages. Dans la section 3, nous spécifions la grille d'analyse et nous la mettons en œuvre pour repérer les points d'ancrage de la conduite autonome. La section 4 analyse les cinq familles de services de mobilité autonome au programme des expérimentations EVRA, selon l'ordre suivant :

² Dans le cas de la France, le Code des Transports comporte pour chaque mode de transport un livre entier spécialement dédié, avec des parties « titres » traitant des véhicules, des services commerciaux et des protocoles d'utilisation

1. Délégation de conduite sur réseau magistral (SAM),
2. Valet de parking (SAM),
3. Livraisons urbaines par robot de fret (SAM),
4. Circuit de navettes de voyageurs en milieu rural (ENA),
5. Lignes de navettes de voyageurs en milieu urbanisé (SAM et ENA).

La section 5 confronte les analyses qualitatives des différents services et en opère une synthèse d'ensemble. En conclusion, la section 6 résume la contribution et trace des pistes de prolongement.

2. Modèle systémique du mode automobile

2.1 Analyse fonctionnelle

Les trois sous-systèmes techniques : Véhicule, Infrastructure et Protocoles, se fédèrent tout naturellement pour servir l'Utilisateur, que nous pouvons appréhender comme un quatrième sous-système, lui aussi d'ordre physique.

Fonction assurée. Le service à rendre est le transport d'entités mobiles dans l'espace et donc dans le temps : déplacement d'un lieu d'origine à un lieu de destination. Le déplacement est un franchissement d'espace : il peut lui être associé une valeur esthétique ou récréative, mais en général la valeur du déplacement tient à l'accès au lieu de destination afin d'y réaliser une certaine activité. Les conditions physiques et économiques du déplacement, temps passé, fatigue, dépenses monétaires, engendrent des coûts d'usage qui tendent à réduire la valeur retirée du déplacement.

Les **entités à transporter** peuvent être des personnes ou des objets (du fret), les deux dans le cas de voyageurs avec des bagages. En transport de personnes, les utilisateurs sont à la fois des clients et des usagers, dont la personne physique est présente dans la production du service, ce qui l'expose à certaines conditions à bord du véhicule ou dans des lieux logistiques, ainsi qu'aux conditions de roulement et de trafic sur l'infrastructure.

Dans le mode VP (« voiture particulière ») originel, l'une des personnes à bord conduira l'automobile. De plus, la VP est détenue par un individu, responsable de son utilisation, de son alimentation en énergie et autres consommables, de son maintien en condition opérationnelle.

Enfin, en tant qu'objet matériel la voiture est la propriété légale d'une personne au sens juridique, qui peut être une personne physique ou une personne morale (entreprise, association, administration).

Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le mode VP s'est répandu très largement parmi la population des pays développés : en moyenne, plus d'une voiture par ménage, 14 000 km de parcours annuel par véhicule, tant pour des usages au quotidien que pour des épisodes de loisir. Cette large diffusion a été permise par une industrie automobile puissante, par la constitution et l'exploitation d'un réseau d'infrastructures routières efficaces, par la fourniture des carburants et des consommables etc.

L'économie du mode repose pour beaucoup sur l'implication de l'utilisateur dans la conduite du véhicule. Le mode « taxi » à conduite humaine est bien plus onéreux à l'usage (facteur 4), et son utilisation est bien moins répandue dans les pays où l'équipement automobile privatif est largement diffusé.

2.2 Les quatre sous-systèmes physiques

Véhicule. Une **automobile** est un véhicule routier à quatre roues, de taille médiane (entre les deux roues et les véhicules longs appelés plus souvent poids-lourds). En tant que véhicule, ses deux fonctions principales sont la **contenance** pour des personnes ou des objets, donc, et le **mouvement** afin de déplacer son contenu ou juste pour se repositionner. En principe, les personnes à bord disposent de places assises et les objets encombrants sont placés dans un coffre. Les places sont assurées par des sièges à l'intérieur d'un habitacle qui non seulement contient mais aussi abrite et protège. L'ambiance à bord est contrôlable en partie : température dirigée, ventilation, éclairage, ambiance sonore, accessoires de divertissement pour les passagers.

Le mouvement est assuré par un système motopropulseur et des organes de commande pour fixer la direction et doser la vitesse – en relation avec les conditions locales courantes sur l'infrastructure de circulation.

L'infrastructure routière est le support physique de la circulation des véhicules, en mouvement ou à l'arrêt.

Au niveau local, l'infrastructure comprend la voie de circulation qui est un objet solide, rigide et résistant, destiné à franchir l'espace et agencé en ce sens : la voie suit un principe longitudinal caractérisé par le « profil en long », tandis que le profil « en travers » est organisé en files parallèles pour une « section courante » ou selon des configurations spécifiques pour des jonctions.

Au niveau global, l'infrastructure s'étend en longueur selon des itinéraires entre des lieux d'accès. La constitution en réseau permet de couvrir et desservir l'espace géographique pour tout couple de lieux en origine et en destination, souvent de manière assez homogène.

L'infrastructure routière est agencée et régulée afin d'être utilisable par les véhicules de manière très largement autonome, selon des règles de circulation et des dispositifs de contrôle d'accès et de régulation du trafic. L'infrastructure est le siège des scènes de trafic : le lieu où surviennent les situations de trafic pour les véhicules qui l'utilisent.

Protocoles. Pour le mode automobile, l'implication d'un utilisateur dans la conduite du véhicule et sa détention, va de pair avec le principe d'autonomie du véhicule dans sa circulation sur l'infrastructure.

Ces deux principes conditionnent fortement la consistance des protocoles : certains sont explicites, d'autres plutôt implicites, la plupart renvoient à des processus d'ordre logistique qui concernent l'infrastructure et/ou les véhicules :

- le Code de la Route règle la détention du véhicule : titre de propriété ou contrat de location, obligation d'assurance, contrôle périodique de l'état technique.
- Le Code régit aussi la conduite du véhicule et son comportement sur la route : principe de maîtrise par le conducteur, d'adaptation aux situations dynamiques, de respect des consignes statiques et dynamiques, règles de priorité, de suivi entre véhicules...
- Moins explicitement que dans un Code, mais de manière standardisée dans la pratique : les protocoles d'alimentation en énergie, par l'utilisation de stations-

services. Et aussi la fourniture locale de services de télécommunication : radio, téléphonie mobile et internet mobile.

- Sur l'infrastructure, les protocoles d'accès, et le cas échéant de paiement de droits d'accès.
- Sur la voie, le marquage au sol ; et le guidage d'accès.
- La signalisation statique.
- L'information dynamique du trafic.

Usager. En transport de personnes, le client du service est une personne humaine qui est aussi un client : par sa présence à bord, l'individu est un usager qui s'expose personnellement au fonctionnement du service, dans lequel il passe du temps. Souvent seul à bord ou en tout petit groupe composé de personnes familières (famille, entreprise), l'automobiliste gère le mouvement du véhicule selon ses besoins et ses préférences, ainsi que l'ambiance à bord. La gestion du mouvement s'opère au plan stratégique de l'itinéraire jusqu'à la destination, et au plan tactique des manœuvres locales.

2.3 Les relations entre les sous-systèmes

En général, les protocoles et les processus de service mettent en relation deux ou trois des sous-systèmes Véhicules, Infrastructure et Usagers. C'est pourquoi nous les avons représentés au centre de l'architecture systémique schématisée en figure 1.

Les interactions se rangent en trois catégories, en fonction des 2 sous-systèmes principalement concernés : I2V pour les relations entre Infrastructure et Véhicule, I2U pour Infrastructure et Usager, V2U entre Véhicule et Usager. De fait les protocoles sont avant tout des interactions entre les autres sous-systèmes.

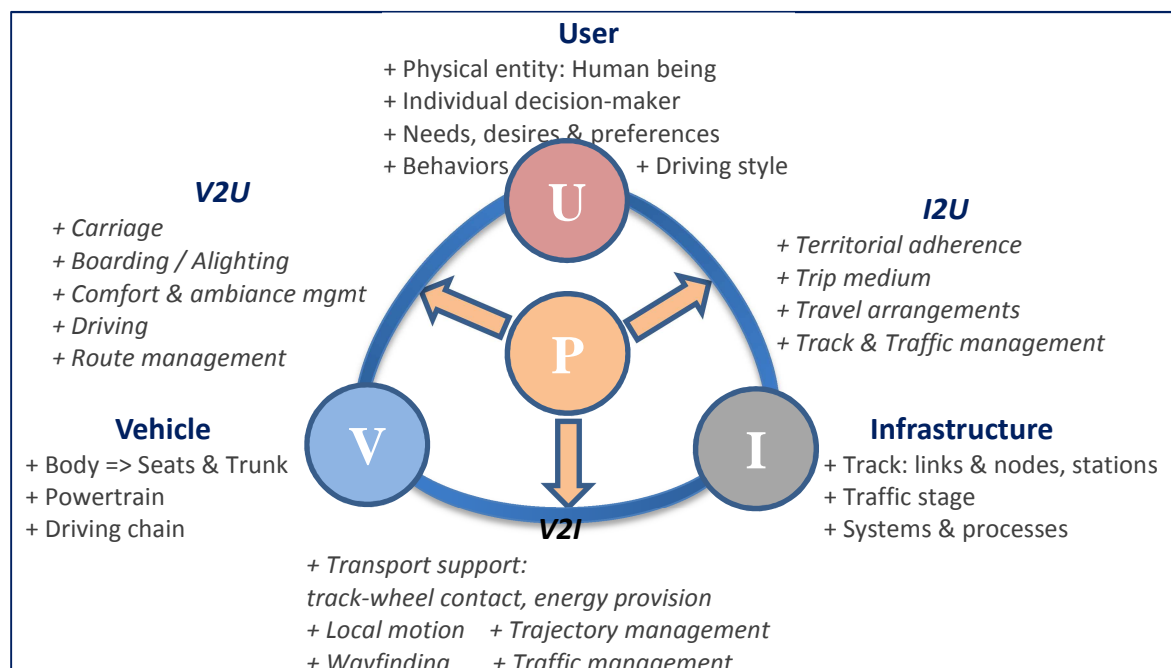


Fig. 1. Architecture fonctionnelle du mode automobile.

Le **I2V** comprend :

- le support physique, en termes de mécanique du solide comme d'alimentation en énergie et de fourniture de télécommunications,
- le conditionnement du mouvement local : marquage au sol et guidage, revêtement et conditions d'adhérence,
- la gestion des trajectoires (par la succession des consignes et contrôles d'ordre local),
- la signalisation de direction et donc la contribution à l'orientation,
- la gestion du trafic.

Le **I2U** recouvre :

- l'adhérence au territoire, par la desserte des lieux en origine et en destination et aussi par la traversée des lieux intermédiaires, leur mise en valeur que ce soit par la conception de l'infrastructure ou par une signalétique spéciale.
- la fourniture de trajectoire
- des arrangements de voyage : fourniture de services en stations, points de rendez-vous...
- information dynamique,
- la gestion du trafic, en situation de conduite humaine du véhicule.

Le **V2U** englobe :

- la contenance (« carriage ») de l'utilisateur dans l'habitacle du véhicule,
- l'abri, la protection,
- l'accès au véhicule pour y monter et en descendre, grâce aux portes,
- *la régulation du confort et de l'ambiance à bord,*
- *la conduite au plan local : actionnement des commandes pour effectuer des manœuvres,*
- *la gestion d'itinéraire, par une suite de sélections de direction,*
- *le maintien en condition opérationnelle,*
- *la détention.*

Les cinq dernières interactions se conçoivent dans le sens U2V pour le mode automobile basique où c'est l'automobiliste qui conduit. Nous les rangeons dans la catégorie V2U afin d'insister sur la prédisposition du véhicule, qui offre à l'utilisateur des dispositifs techniques pour le rendre régulateur des fonctions associées. Autrement dit, par conception, le véhicule se prête à des régulations par l'utilisateur.

3. Le digital : automatisation, connectivité, et autonomisation ?

La conduite automobile est une fonction complexe en raison de l'ouverture et de la diversité du milieu de circulation. Cette fonction est en voie d'automatisation, avec l'objectif idéal d'une délégation totale permettant jusqu'à la circulation du véhicule sans personne à son bord. C'est la transformation digitale du mode automobile qui rend envisageable ce but. Avant d'analyser la conduite autonome (§ 3.3), nous allons relever les perfectionnements numériques déjà concrétisés au titre de l'automatisation et de la connectivité, pour les infrastructures (§ 3.1) autant que pour les véhicules (§ 3.2). De plus, nous analysons le rôle spécifique de l'opérateur d'un service de mobilité basé sur des véhicules à conduite autonome (§3.4). Enfin, nous proposons une matrice d'analyse pour de tels services (§3.5).

3.1 Infrastructure et connectivité digitale

Pour mémoire, l'infrastructure routière a été vecteur de communication (courrier postal) et son corps de chaussée abrite souvent des canaux d'information (câbles téléphoniques, fibre optique). Réciproquement, les télécommunications permettent d'innover l'infrastructure et amplifient considérablement ses fonctionnalités :

- pour la télécommande d'équipements de sécurité et d'exploitation (régulation des carrefours etc), l'interaction avec les véhicules de patrouille et d'intervention d'urgence,
- la télésurveillance de la circulation, par caméras et d'autres types de capteurs,
- le traitement centralisé des données locales, la fabrication et la diffusion d'information dynamique du trafic.

La diffusion de la téléphonie mobile a permis aux automobilistes d'émettre des messages vers l'opérateur ou vers des médias sociaux, de contribuer à la détection d'incidents et à la caractérisation des conditions de trafic.

Il y a là une relation V2I qui renforce le I2V⁽³⁾.

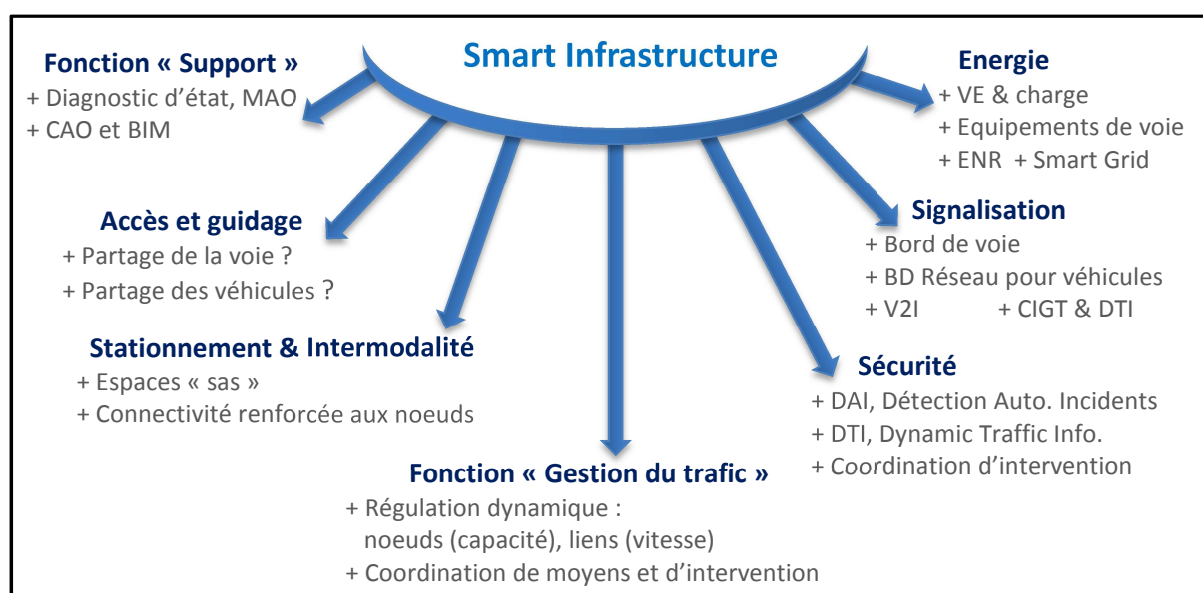


Fig. 2. L'infrastructure et son amplification digitale (d'après Leurent et al. 2018).

³ et améliore considérablement les dispositifs anciens tels que le réseau des bornes d'appel d'urgence le long des grandes routes

3.2 La transformation digitale du véhicule

Beaucoup de « systèmes intelligents de transport » ont été développés depuis les années 1980, les uns pour les infrastructures, les autres pour les véhicules ⁽⁴⁾.

Retenons-en :

- Des dispositifs améliorant le confort : commande vocale ou tactile de diverses fonctions, personnalisation automatique du siège selon des réglages individuels enregistrés, régulation thermique fine, contrôle de fermeture des portes et des ceintures de sécurité, gestion centralisée de l'ouverture ou de la fermeture des portes... complémentation ou remplacement du tableau de bord par une tablette interactive... ou encore des dispositifs de divertissement, au bénéfice direct des passagers et indirect du conducteur.
- Côté sécurité, le numérique amplifie la supervision de l'état du véhicule : certains dispositifs cités à propos du confort du conducteur concernent aussi la gestion de la sécurité. L'état physique du véhicule en tant qu'ensemble d'éléments est désormais contrôlé par un ensemble de capteurs, par exemple pour la pression des pneus, le niveau de liquide pour le système de freinage ou pour le système de refroidissement d'un moteur thermique. Ces capteurs remplissent des fonctions d'alerte et participent à fiabiliser le véhicule, donc à éviter des incidents potentiellement dangereux. Des systèmes intelligents d'aide à la conduite participent de manière plus active à la sécurité : régulation de vitesse, contrôle latéral de trajectoire, régulation d'espacement relativement au véhicule prédécesseur, détection d'obstacles etc.
- Gestion énergétique : la gestion électronique du régime d'un moteur thermique est devenue très fine, afin de réduire la consommation d'énergie, le bruit et les émissions polluantes. L'automatisation de la boîte de vitesses va dans le même sens. L'état de remplissage du réservoir ou de la batterie est mesuré et rapporté au conducteur, de même que les taux de consommation d'énergie en temps réel, ce qui permet d'ajuster le style de conduite.
- La gestion du mouvement est assistée par divers dispositifs d'aide à la conduite, déjà signalés à propos de sécurité. Le numérique permet aussi de gérer la capacité motrice, en particulier pour des véhicules à plusieurs moteurs (notamment hybrides thermique et électrique). D'autres dispositifs assistent le conducteur pour ses manœuvres de stationnement, en observant par caméra l'environnement immédiat du véhicule et en proposant une vue d'ensemble sur un écran dédié ou une fenêtre dédiée sur la tablette de bord.

Ainsi le numérique amplifie les caractéristiques essentielles d'une automobile, au service des interactions avec ses occupants, avec les conditions de trafic et de stationnement, avec l'environnement (consommation d'énergie, émissions polluantes). Plus profondément, le numérique transforme radicalement l'automobile en ajoutant deux caractéristiques majeures : la connectivité et la serviabilité.

La **connectivité** peut être définie comme la capacité d'échanger des informations en temps réel pour interagir et coopérer avec d'autres entités : autres véhicules, opérateur

⁴ Cf. le « manuel des ITS » constitué progressivement par l'Association Mondiale de la Route

d'infrastructure, système gestionnaire d'un service... Les boîtiers embarqués (OBU) sont emblématiques : pour bénéficier du télépéage, pour obtenir une information de trafic dynamique, une recommandation d'itinéraire, un service de guidage sur le terrain. L'interaction a un sens réciproque : le conducteur et/ou le véhicule peut fournir de l'information à un système externe, pour faire part d'un incident de trafic, d'une congestion locale, d'une carence de signalisation etc. La géolocalisation tient un rôle essentiel dans ces relations.

La « **Serviabilité** » (« *serviceability* ») concerne la mutualisation de l'usage : mutualisation en temps réel pour le covoiturage, ou en temps différé pour l'autopartage. Cette faculté est comparable à l'intégration d'un taxi dans un système centralisé de réservation. Elle requiert l'intégration du véhicule dans un système intelligent qui centralise des demandes d'usage et en affecte certaines au véhicule. La serviabilité désigne les dispositions conférées au véhicule pour interagir avec le système et être mis au service de demandes de réservation ou de hailing (en mode digital ou visuel), pour permettre l'accès du véhicule (en l'absence du conducteur) à d'autres utilisateurs, pour participer à un ou plusieurs systèmes.

Au total, la transformation digitale du véhicule est primordialement une transformation gestionnaire : (i) gestion interne, (ii) interaction avec les conditions locales immédiates ou à distance, dans un système assurant la circulation et/ou le stationnement, (iii) inclusion en tant qu'élément mobile dans un système assurant un ou plusieurs services de mobilité.

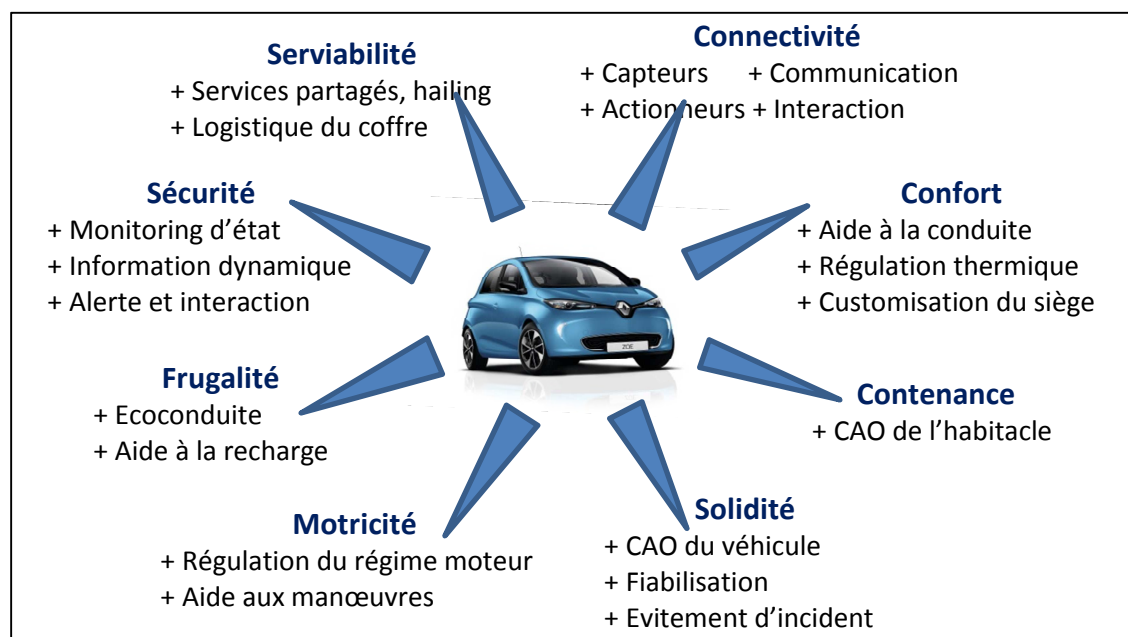


Fig. 3. L'automobile et son amplification digitale (d'après Leurent et al. 2018).

3.3 Vers la délégation de conduite

Jusqu'à présent, la majorité des déplacements en automobile sont réalisés par un conducteur seul à bord de son propre véhicule. L'utilisation d'un service de mobilité autonome met en question tout un ensemble d'aspects :

1. la délégation de conduite concerne la gestion du mouvement du véhicule sur l'infrastructure en termes de progression et de respect des consignes locales ; les manœuvres vers l'avant ou l'arrière, les changements de direction, rattrapages et

dépassements, croisements et évitements, arrêts provisoires... ainsi que la gestion des rapports avec d'autres véhicules au sein du trafic, manœuvres relatives, émission et réception de signaux lumineux ou sonores... et encore la gestion des situations d'urgence, en cas notamment de défaillance.

2. la gestion de l'ambiance et du confort à bord : température et ventilation, ambiance sonore et lumineuse, réglage des sièges et des positions.
3. la gestion des « présences à bord » : quelles personnes sont acceptées, à quelles places, dans quelles conditions d'interaction, et ce selon leurs préférences respectives ? Quels bagages, à quels emplacements ?
4. en cas d'itinéraire à péage ou de stationnement payant, qui décide de la dépense, et qui payera le prix, comment sera-t-il réparti entre les parties prenantes ?
5. la commande du service de déplacement ; dans quelle mesure l'utilisateur pourra-t-il choisir et ajuster l'horaire de départ, l'allure et les arrêts, l'horaire d'arrivée ? Quel itinéraire sera servi, l'utilisateur participera-t-il à sa sélection ?
6. la maintenance en condition opérationnelle (MCO) d'ordre physique : quels seront les états nominaux ou dégradés au plan mécanique (pour les différents organes, y compris les équipements de signalisation et d'éclairage), au plan énergétique, en matière de propreté intérieure et externe ? Quels processus pour surveiller, entretenir, remettre en condition ?
7. la MCO d'ordre social : quelles dispositions pour assurer le véhicule, pour lui réserver des droits d'accès (ex. abonnement de passage dans une zone ou de télépéage autoroutier, ou de stationnement dans un parc) ? Quelles stratégies de positionnement du véhicule durant ses périodes d'inactivité, pour son stationnement nocturne, pour la protection de son intégrité ?

3.4 Situation de l'opérateur du service

Le questionnement précédent concerne un véhicule en particulier pour un utilisateur quelconque. Un service de mobilité autonome basé sur une flotte d'automobiles coordonnera leurs utilisations, leur affectation aux demandes de différents clients, leurs parcours sur le réseau, leur stationnement et toutes opérations d'ordre logistique.

Dans ces conditions, le sous-système Protocoles sera renforcé par l'implication de l'opérateur. Celui-ci aura une stratégie spécifique et il l'appliquera dans ses relations avec les autres sous-systèmes, ce qui les transformera :

- L'opérateur remplacera l'utilisateur pour la gestion du véhicule : notamment pour la MCO d'ordre social et la MCO d'ordre physique.
- L'opérateur aura fixé les processus de conduite autonome, ainsi que les protocoles de commande des parcours, de contrôle des présences à bord et des conditions ambiantes. La part d'initiative laissée aux usagers s'inscrira dans le cadre fixé par l'opérateur.
- Entre l'opérateur et l'utilisateur, les protocoles conditionneront la qualité du service pour le client. La prestation de service s'inscrira dans une relation commerciale explicite, dans un « Parcours client » incluant des étapes de Plan / Book / Ticket.

- L'opérateur aura des politiques de tarification et de fidélisation envers ses clients. Il tendra à les segmenter en fonction de leurs besoins et de leur consentement à payer, et à proposer différentes formules de prestations et de tarifs.
- La professionnalisation et l'industrialisation du service requalifieront la relation avec l'infrastructure. La relation unitaire entre un véhicule et l'infrastructure prendra place dans une relation globale entre le service et l'infrastructure, en termes de conditions d'accès (physiques et tarifaires) et d'attribution de facilités spécifiques :
 - espaces de stationnement et de maintenance,
 - équipements de recharge électrique,
 - possibilité d'intégration dans un système territorial de transport public (cf. notion de MAAS).

La dimension du service de mobilité autonome, l'échelle de sa production, est une caractéristique essentielle supplémentaire pour un mode VP. En effet, la dimension unitaire de la VP a limité les possibilités d'interaction avec les pouvoirs publics : régulation de l'acquisition et de l'utilisation du véhicule, relations indirectes via l'infrastructure et les constructeurs automobiles. La dimension industrielle du service ouvre d'autres possibilités. Les relations entre les pouvoirs publics et les sociétés de taxis ou de VTC constituent une référence évidente. Cependant un service de mobilité autonome qui réussirait à faire foisonner la demande et à rendre très productive une flotte importante, pourrait atteindre une dimension supérieure, dont la taille spécifique appellerait alors une régulation spécifique – en considération de ses performances économiques, sociales et environnementales, et particulièrement de ses complémentarités avec le transport collectif de personnes.

3.5 Une grille pour l'analyse

Au terme de cette exploration qualitative, récapitulons-en les points essentiels sous la forme d'une liste de questions destinées à connaître, décrire et comprendre un service particulier de mobilité autonome :

1/ **Consistance du service** : quel est le service rendu et à qui, quels lieux sont desservis, et quels sont les utilisateurs ?

2/ **Qualité de service** : quels en sont les caractères / aspects essentiels ? Quelles conditions à bord pour l'utilisateur d'un véhicule ? Quel temps d'attente, quel temps de parcours ? Quels protocoles d'utilisation ?

3/ **Commercialisation** : quelles conditions commerciales sont offertes, à qui ? Sur quoi porte la fonction commerciale du service : sur l'ensemble du « parcours client » dans ses étapes de Plan (organisation, sélection), Book (réservation), Ticket (tarification et paiement), et même aux étapes complémentaires d'Inspire (inspiration de la demande, en amont), d'Evaluate (feedback a posteriori) et d'Usage (entre le Book et le Ticket, quand le client est aussi usager) ? Les opérations de transaction sont-elles faciles et fluides ?

4/ **Production de service** : quel transport le service produit-il ? Quelle activité au total par journée d'exploitation (nombre de courses, voyageurs.km) et par véhicule ? Quelle occupation moyenne des véhicules ? Y a-t-il des incidents, avec quelle fréquence et de quelle nature ?

5/ Quelle **composition physique** du service ? Quels lieux sont fréquentés ? Y a-t-il des agencements spécifiques sur l'infrastructure, lesquels et où ? Quels itinéraires sont parcourus ? Quelle flotte de véhicules ? Quelle logistique « interne » de positionnement, mise à disposition ? Quelle recharge, quel nettoyage, quelle maintenance ? Quelles fonctions gestionnaires et quelle plateforme de coordination ?

6/ **Economie du service** : quels sont les coûts de production et comment sont-ils imputables aux différents moyens impliqués ? A quoi sont dues les recettes commerciales et à quel niveau s'élèvent-elles ? L'exploitation est-elle profitable pour l'opérateur, celui-ci atteint-il le « petit équilibre » ou mieux encore le « grand équilibre » ?

7/ **Impact environnemental** : quels impacts unitaires par voyageur.km transporté en consommation d'énergie, en émissions de polluants ? Quelle performance relative, par rapport aux modes de transport disponibles alternativement pour les déplacements réalisés par le service ? Quel est le ressenti des riverains de l'infrastructure fréquentée par le service ?

8/ **Impact social** : quelle est la satisfaction des utilisateurs relativement aux autres solutions de transport disponibles pour leurs déplacements ? Quelles sont les conséquences du fonctionnement du service sur les autres usages de la voirie, en termes de circulation et de stationnement ? Y a-t-il des conséquences sur les opérateurs d'autres services de mobilité, de quelles natures et à quels niveaux ? En interne au service, combien d'agents pour remplir quelles fonctions, et dans quelles conditions de travail et d'emploi ?

9/ **Aspect institutionnel** : quelles relations, à quels sujets et sous quelles formes, le service entretient-il avec les acteurs suivants : opérateur d'infrastructure, collectivités territoriales, constructeur de véhicules, fournisseur d'énergie, opérateurs des autres services de transport dans le territoire ? (liste non exhaustive) On pourrait considérer aussi des associations d'usagers, ou de riverains.

La figure 4 illustre la matrice d'analyse, en positionnant les neuf thèmes les uns par rapport aux autres. La colonne de gauche retrace la perspective des clients (ligne rouge). La ligne supérieure est celle du producteur (ligne bleue). La colonne de droite traite d'économie au sens large, la ligne inférieure retrace la perspective de la collectivité (ligne verte).

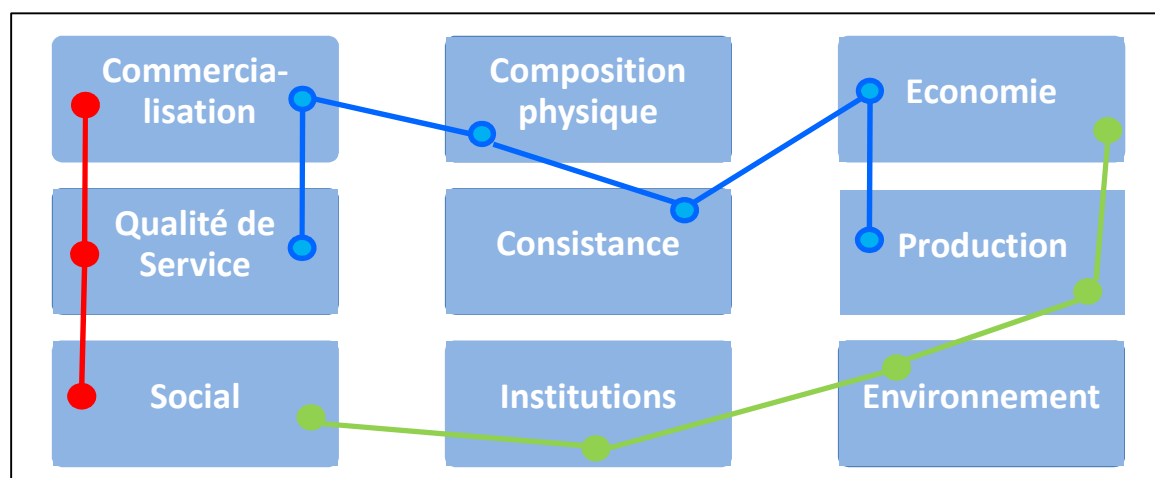


Fig. 4. Matrice de caractérisation.

4. Analyse des familles de services dans le programme EVRA

Dans cette partie, nous allons appliquer la grille d'analyse afin de reconnaître les caractéristiques essentielles de différents services basés sur des véhicules autonomes. Nous considérons les services sélectionnés par l'ADEME dans son Appel à Projets EVRA : Expérimentations du Véhicule Routier Autonome, lancé mi 2018. Deux programmes d'expérimentation, SAM et ENA, ont été retenus en avril 2019. Les deux programmes ont pour but commun d'explorer des potentialités de services dans une diversité de situations en France.

Nous distinguons cinq familles de services :

1. Délégation de conduite sur réseau magistral (SAM),
2. Valet de parking (SAM),
3. Livraisons urbaines par robot de fret (SAM),
4. Circuit de navettes de voyageurs en milieu rural (ENA),
5. Lignes de navettes de voyageurs en milieu urbanisé (SAM et ENA).

A la date de janvier 2020, la plupart des solutions sont en voie d'implémentation sur leurs sites respectifs. Notre analyse restera donc qualitative. De plus, chaque expérimentation est fragmentaire, elle concerne un très petit nombre de véhicules, un sous-réseau routier très restreint et une sous-population réduite d'utilisateurs : les enseignements à en tirer seront principalement d'ordre qualitatif, ils ne présageront que partiellement des effets quantitatifs d'un service déployé « en grandeur réelle » dans un territoire.

4.1 Délégation de conduite sur réseau magistral (SAM)

L'expérimentation n°1 du programme SAM concerne la délégation de conduite automobile sur des itinéraires routiers qui présentent des sections spécifiques : franchissement de tunnels et de bretelles d'accès. Les itinéraires retenus sont situés en région Ile-de-France : sur des voies rapides urbaines de type autoroutier, entre l'aéroport de Roissy au nord, La Défense et Saint Arnoult en Yvelines au sud.

Des voitures spécialement équipées, fournies les unes par PSA et les autres par Renault, seront utilisées pour parcourir des itinéraires entre des points d'extrémité qui feront office à la fois de gares d'embarquement et débarquement pour les utilisateurs des voitures, et d'agences pour la logistique du service. Les utilisateurs sont choisis pour représenter différents profils d'automobilistes, parmi des candidats sollicités dans des populations particulières (employés de Vinci Autoroutes et d'Aéroports de Paris).

Nous avons ainsi décrit la **consistance** du service : délégation de conduite sur réseau routier de type magistral (voies à chaussées séparées, accès réservé aux véhicules motorisés immatriculés), sur des itinéraires en Ile-de-France, pour une population sélectionnée d'utilisateurs.

La **qualité de service** tient au déchargement de la tâche de conduite, permettant à l'automobiliste de relâcher son attention et de profiter davantage du voyage, du confort de la voiture. L'usage de la voiture est particulier, sans partage en temps réel. L'utilisation est programmée à l'avance, ce qui n'est pas représentatif du déploiement réel d'une telle fonctionnalité.

Les **conditions commerciales** ne sont pas davantage représentatives. Il n'y a pas de tarification – d'ailleurs en situation réelle le coût du service serait vraisemblablement intégré au coût d'acquisition du véhicule. Le processus de réservation-programmation est assorti d'une instruction préalable à la délégation de conduite, afin de gérer les transitions entre conduite manuelle et conduite déléguée.

La **composition physique** du service repose sur les véhicules impliqués et leurs équipements spécifiques, ainsi que sur des équipements en bord de route pour géolocaliser finement et permettre au véhicule d'anticiper la scène de trafic qui se présentera en aval de sa position courante.

Ces dispositions constituent la technologie testée. Il s'y ajoute l'organisation et l'agencement des points de relais, et leurs agents qui assurent l'accueil des automobilistes autant que la logistique des véhicules.

La **production de service** consiste en les parcours réalisés. On peut la mesurer en nombre de trajets par itinéraire, et totaliser les distances ainsi parcourues.

Concernant **l'économie du service**, il faut distinguer d'une part l'organisation et l'agencement de l'expérimentation, incluant l'équipement des véhicules et des infrastructures, et d'autre part la performance économique des trajets réalisés. En principe, la délégation de conduite se prête à l'éco-conduite, donc à des économies d'énergie.

L'**impact social** tient d'une part au gain de confort pour l'automobiliste, d'autre part au gain de fluidité pour le reste du trafic. On postule que la conduite déléguée est moins impulsive et plus coopérative que la conduite manuelle.

L'**impact environnemental** s'analyse comme l'économie du service. En ce qui concerne la réalisation des parcours, une moindre consommation d'énergie ira de pair avec de moindres émissions de polluants, si le véhicule est thermique. Une conduite plus douce générera moins de bruit. La motorisation électrique épargne le bruit du moteur mais pas le bruit du roulement qui domine à vitesse élevée, ce qui est le cas en situation fluide sur des itinéraires de type autoroutier.

Aspect institutionnel : le groupement d'expérimentation associe principalement les constructeurs automobiles PSA et Renault aux opérateurs routiers que sont Vinci Autoroutes et la Dirif, service de l'Etat qui gère les autoroutes non concédées à l'intérieur de la région.

Au total, l'application de la grille révèle qualitativement les caractéristiques fonctionnelles de l'expérimentation. Nous avons fait la distinction entre la réalisation des parcours, qui constitue l'objet essentiel de l'expérimentation, et l'implémentation des dispositifs opérationnels, autrement dit sa partie accessoire.

Deux points appellent une attention particulière :

1. Concernant les transitions entre conduite manuelle ou déléguée, quel est le protocole, son aisance ou sa difficulté pour l'automobiliste ? Le ressenti spécifique et ses variations parmi les usagers, constituent un attendu important de l'étude.
2. Pour les automobilistes qui réalisent les trajets de test, il convient d'assurer la fluidité d'ensemble de leur déplacement, en facilitant les portions terminales et en gérant le retour associé au trajet en sens aller. Et ce, afin d'éviter que l'automobiliste n'impute au parcours testé une pénibilité ressentie sur le reste de son déplacement.

4.2 Valet de parking (SAM)

L'expérimentation n°2 du programme SAM concerne la conduite autonome d'automobiles entre un point à l'entrée d'un parc public de stationnement et des places à l'intérieur de ce parc. Ainsi la notion de valet est automatisée grâce à l'intelligence du système. Le parking Indigo à Paris près de la gare d'Austerlitz, constitue le site expérimental. Des véhicules spécialement équipés sont fournis par Renault : un véhicule prototype ainsi qu'une flotte de 12 à 15 véhicules électriques en autopartage.

Consistance du service. Le véhicule se prend en charge pour la phase terminale de son propre parcours, tandis que l'utilisateur économise le temps de stationnement, l'effort de conduite associé et le temps à pied à l'intérieur du parking. Le gain est d'autant plus important que le parking est plus grand, qu'il est situé plus en profondeur, et donc moins agréable pour un individu en voiture ou à pied.

La **qualité du service** consiste primordialement dans cette économie de temps et de pénibilité pour l'utilisateur. A titre accessoire, on peut imaginer que la prise en charge du véhicule par le parking comme système, permette d'ajouter des services de recharge en électricité, nettoyage, ou encore de livraisons dans le coffre.

Les **conditions commerciales** sortent du cadre de l'expérimentation. On peut imaginer qu'un gain de temps de 1 ou 2 min à chaque extrémité du déplacement, justifie un tarif de l'ordre de 1 € à chaque stationnement, en plus du tarif de base quand le parc est payant. Il conviendra d'intégrer les deux facturations, et donc d'inclure la prestation de facturation et paiement dans le service de valet automatique. De plus il faudra assurer en amont la disponibilité d'une place, car il n'est pas acceptable de rencontrer un refus d'accès alors qu'on attend un accès ultra-facilité.

La **composition physique** du service repose sur les véhicules équipés et sur des équipements infrastructurels dans le parking, en particulier de géolocalisation fine en milieu souterrain, de capteurs d'occupation des places de stationnement, de capteurs du trafic automobile et piéton à l'intérieur du parking, afin de sélectionner l'itinéraire du véhicule.

La **production de service** se mesure évidemment par le nombre de prestations accomplies, à l'arrivée comme au départ.

L'**économie du service** paraît relativement simple, car la qualité de service est évidente pour l'usager, et la tarification est couramment associée à l'usage d'un parc de stationnement. Les moyens à investir sont essentiellement des équipements, en site semi-public donc protégé. Leur rentabilisation par des utilisateurs réguliers du service nécessite seulement qu'un nombre suffisant des utilisateurs potentiels disposent d'un véhicule compatible et acceptent le principe du service.

Au **plan social**, au premier ordre le service paraît entièrement bénéfique. Les utilisateurs sont gagnants. Les autres usagers du parking, dans leur mouvement en voiture comme dans leur mouvement à pied, devraient bénéficier d'un moindre encombrement des chemins internes au parking, du fait de l'optimisation des itinéraires pour les véhicules à délégation ; on peut imaginer aussi les faire bénéficier du guidage vers des places vacantes. Cependant il faut veiller à ce que :

1. Le point de rendez-vous pour la dépose ou la prise en charge de la voiture par son utilisateur, ne soit pas une source de congestion.

2. L'attribution des places au service ne défavorise pas le reste des utilisateurs du parking.
3. La facilitation du stationnement n'induit pas un recours accru à l'automobile. Ce dernier risque devrait être contenu grâce à l'instrument tarifaire.

Au **plan environnemental**, on escompte une réduction de consommation d'énergie et d'émissions polluantes en raison d'une circulation plus efficace à l'intérieur du parking. Si celui-ci est souterrain, la réduction d'émissions polluantes et d'émission de bruit, n'a pas de conséquences immédiates autres que sur les usagers du parking, du fait de l'enveloppe bâtie (et si on filtre l'air intérieur extrait vers l'extérieur).

Aspect institutionnel : le service relève au premier chef de l'opérateur de parking. Cependant l'expérimentation est pilotée par l'équipement automobile Valéo, intéressé par le système de supervision.

Particularités signalées :

1. Les véhicules garés automatiquement disposeront-ils de places dédiées ? Si oui, avec quelles particularités, et quelles incidences potentielles sur les performances, induisant un biais dans l'estimation du passage à l'échelle ?
2. Le protocole d'abandon de la voiture, et celui de reprise, sont à spécifier en détail ? Préciser en particulier la gestion des clefs du véhicule : l'ouverture-fermeture centralisée à distance paraît la solution la plus pertinente, et ce avec une clef numérique plutôt qu'un signal analogique.
3. Quand plusieurs véhicules équipés demanderont le service au même moment, le système devra être capable de les gérer simultanément, en anticipant leurs trajectoires de manière conjointe.

4.3 Robot de fret (SAM)

L'entreprise Twinswheels propose des robots « droïdes » pour assister un opérateur humain (facteur, livreur), ou assurer seuls, la réalisation d'une tournée : livraison et ramassage de petites charges. Le robot transporte les charges et se déplace sur le trottoir ; si un opérateur humain est présent il avance à pied et assure les transferts terminaux des charges entre le robot et les clients.

L'expérimentation aura lieu sur un site à Montpellier, avec deux types de robots. Chaque robot participera à un ensemble de tournées réalisées dans différentes conditions, avec différents livreurs ou sans livreur, et sur différents trajets desservant des émetteurs-récepteurs d'envoi. Un type de prestation relie des producteurs locaux à des commerces et restaurants en centre-ville. Un autre type traite des envois entre un hub logistique et des commerçants.

Consistance du service. Le robot transporte un ensemble d'envois : il décharge ainsi le livreur humain ⁽⁵⁾. Sa présence permet au livreur de se déplacer uniquement à pied, plutôt

⁵ Nous postulons la présence d'un livreur ; alors qu'en janvier 2020 le déroulement final de chaque livraison par Twinswheels paraît encore incertain. Dans le même temps, aux Etats-Unis, Ford commence à proposer des droïdes bipèdes (mais sans tête) capables de grimper des escaliers en portant des charges, afin d'assurer les 50 derniers mètres : cf. Vitard, A. (2020 : Jan.6) <https://www.usine-digitale.fr/article/developpe-par-ford-le-robot-de-livraison-digit-est-officiellement-commercialise.N917179>

qu'avec un deux roues ou une fourgonnette. Pour un circuit de tournée adapté à la marche, on attend un gain de temps (de parcours et de tri) et de pénibilité pour le livreur.

La **qualité de service** joue sur deux tableaux. D'une part, la facilité pour le livreur d'interagir avec le robot pour déposer ou récupérer un envoi : en particulier, présenter automatiquement le prochain envoi à livrer selon l'ordre du circuit ; et réciproquement, une collecte permet d'optimiser l'ordre de décharge. Le second plan concerne les phases de marche entre deux stations de ramasse-dépose : le robot devra ajuster son allure à celle du livreur, ni trop lent ni trop vite, et éviter que sa participation ne complique la tournée.

Les **conditions commerciales** sortent du cadre de l'expérimentation. Pour l'opérateur de fret, le robot est un véhicule à particularités, un équipement parmi d'autres dont le prix ou le loyer doit correspondre au niveau de productivité qu'il permet d'atteindre.

La **composition physique** du service repose sur les robots et les opérateurs impliqués, ainsi que les agences de groupage/dégroupage des envois. Il faut prévoir les moyens et la logistique propres aux robots eux-mêmes.

La **production de service** se mesure en nombre d'envois traités, en masse et volume de ces envois, et en distance parcourue en moyenne par envoi. On rapportera de tels indicateurs de production au temps passé par les opérateurs d'une part, par les robots d'autre part, afin d'obtenir des indicateurs de productivité.

Les impacts économiques, sociaux et environnementaux dépendent de la configuration du service. Nous postulons ici une configuration avec couplage entre un robot et un opérateur, afin d'éviter de déporter vers les clients la transaction avec le robot.

Au **plan social**, en principe le service améliore les conditions de travail de l'opérateur (vérifier le ressenti) et permet de gagner du temps, donc de la productivité. Il pourrait en résulter une réduction d'emploi, par effet d'éviction.

Si les robots circulent sur la chaussée, leur lenteur gênera les autres véhicules. S'ils circulent sur les trottoirs alors ils gêneront les piétons et les manœuvres de stationnement.

Au **plan économique**, on attend une réduction du coût de production des tournées des opérateurs, en contrepartie du coût de détention et d'utilisation des robots.

Au **plan environnemental**, l'impact dépend du moyen de transport auquel le robot se substituera. S'il s'agit de la marche ou d'un deux roues, le robot sera plus consommateur et davantage émetteur d'impacts. En revanche, le service a un impact environnemental moindre qu'un véhicule automobile (hors fabrication du véhicule et économie d'échelle).

Plan institutionnel. Chaque service de transport est offert par un opérateur spécialisé : STEF (produits agricoles) et La Poste (entre hubs et commerces), en partenariat avec Twinswheels.

Particularités signalées :

1. l'implication d'un livreur nous paraît indispensable pour les interactions avec les clients du service.
2. La circulation sur le trottoir engendrera des interactions avec les piétons (encombrement ou curiosité), qu'il faudra rendre fluides.
3. Quelle gestion de la mobilité pour les piétons rencontrés sur le trottoir, gênés par le robot et désireux de le contourner, quitte à emprunter la chaussée ? L'opérateur pourrait y contribuer.

4.4 Circuit de navettes en zone rurale : Cœur de Brenne (ENA)

L'expérimentation ENA – Cœur de Brenne propose un service de taxi autonome (6 places) reliant 5 communes du territoire rural « Cœur de Brenne » dans le département de l'Indre. Le réseau à parcourir totalise une vingtaine de km de routes rurales. Les clients visés sont des personnes dépourvues de voiture : jeunes, personnes âgées et isolées. Les motifs d'utilisation sont notamment d'accéder à des commerces et services qui n'existent que dans certaines des communes reliées.

Consistance : le service est un transport public à la demande, en mode de taxi collectif. L'alternative est de se faire conduire en voiture par un parent ou un voisin : or cette solution n'est pas toujours disponible.

Qualité de service : Le véhicule offre des places assises confortables. En cas de partage, les détours sont limités au temps d'arrêt pour la montée ou la descente d'autres passagers. Le long du circuit parcouru, le temps de transport est comparable à celui en voiture particulière. Le temps d'attente sera dimensionné par la demi-circonférence du circuit (environ 12 km) et la vitesse commerciale moyenne (disons 40 km/h), soit 10 min, en plus d'un intervalle programmé pour la répétition des cycles.

Commercialisation. Les clients seront des relais d'information, de même que les commerces et services destinataires des trajets. La fonction « à la demande » pourra être assurée par des bornes d'appel en des stations marquées au sol, et aussi par une application mobile gérant le parcours client (à ajuster à l'aptitude digitale du public visé).

Composition physique du service : Deux taxis autonomes, chacun avec un opérateur de sécurité. Une plateforme d'information et réservation, ainsi qu'un dépôt logistique et un dispositif d'entretien.

La **production de service** se comptera en nombre de trajets servis et en distance parcourue par les passagers. On pourrait aussi considérer des indicateurs de l'accessibilité produite par le service : nombre d'utilisateurs distincts, vitesse commerciale moyenne des trajets.

L'**économie du service** est intermédiaire entre un service de transport collectif et un service de taxi. On peut imaginer une tarification à l'usage ainsi qu'un subventionnement par la collectivité – d'autant plus que les opérateurs de sécurité auront aussi un rôle d'accueil, d'écoute et d'assistance envers les utilisateurs âgés et isolés. Les taxis collectifs étant électriques, les consommations d'énergie coûteront bien moins cher que le carburant d'un autobus.

Impact social : les utilisateurs bénéficieront à la fois du service de transport et de la relation humaine avec l'opérateur de sécurité. Les personnes sollicitées précédemment comme conductrices-accompagnatrices seront déchargées à la fois des trajets et de l'activité qui les motive. Comme les routes concernées sont peu fréquentées, la circulation du service n'engendrera pas de congestion.

Impact environnemental. Par rapport au service d'accompagnement rendu par un proche, le taxi est électrique et on escompte qu'il profite à plusieurs personnes en même temps. Par rapport à des solutions alternatives d'ordre privé au moyen d'une voiture thermique, le principe du circuit éliminera les départs à froid et les surconsommations ponctuelles associées. Dans ces conditions sa circulation sera nettement moins consommatrice d'énergie et émettrice d'impacts par personne transportée et par unité de distance parcourue.

Aspect institutionnel : le service est exploité par la société Berthelet, associée à Eiffage comme aménageur, Navya fournisseur des taxis « Autonom Cab ». L'expérimentation est coordonnée par la communauté de communes Cœur de Brenne (5 130 habitants), soutenue par le Département de l'Indre et la Région Centre-Val de Loire.

Points d'attention :

- A bord de chaque taxi, le rôle social de l'opérateur de sécurité envers les passagers, qui seront pour beaucoup des personnes âgées et isolées.
- Etudier les couplages potentiels avec le transport scolaire.
- Envisager aussi le transport de biens entre les communes desservies.

L'implantation en zone rurale différencie ce service des navettes en milieu urbanisé. Les conditions de circulation seront spécifiques : routes peu fréquentées mais à vitesse relativement importante sauf pour les vélos et les engins agricoles, passage d'animaux, influence de la végétation sur la visibilité, exposition de la chaussée aux intempéries (dont chutes de branches).



Fig. 4. Le circuit des 5 communes reliées par le service ENA – Cœur de Brenne. (Source : traitement par l'auteur de données Google Earth).

4.5 Navettes autonomes en milieu urbanisé

En France, deux constructeurs Navya et Easymile se sont spécialisés dans la conception et la construction de navettes autonomes électriques. Des expérimentations à valeur de démonstration technique ont eu lieu sur différents sites à Paris, La Défense, Lyon et d'autres grandes villes, sur des parcours d'amplitude limitée, avec à bord la présence d'un opérateur de sécurité.

Les expérimentations du programme EVRA visent spécifiquement à développer le service de transport rendu par les navettes : parcours plus longs, passages plus fréquents et plus réguliers, articulation au réseau de transport collectif, desserte spéciale d'équipements publics. Le tableau 1 décrit les différents services testés dans le programme, en termes de territoire, de fonction de transport, de parcours, de flotte de véhicules, de pilote d'expérimentation. Un enjeu particulier est l'interopérabilité entre les navettes des différents constructeurs.

La **consistance commune des services** ressort du transport public de voyageurs, à la demande en des stations le long du circuit fixé. Certains services peuvent être mutualisés en temps réel ; les autres sont des taxis en rabattement vers une gare ou un noyau urbain. Les parcours ont des longueurs limitées à quelques kilomètres. Chaque service est posé en complément au transport collectif massif : complément dans l'espace et aussi dans le temps (exploitation nocturne).

La **qualité de service** tient aux conditions de parcours et d'attente. Le confort des sièges est assuré dans les taxis, à vérifier dans les navettes. Le temps de parcours est contenu de par les distances couvertes et l'absence de détour, mais la vitesse commerciale est modérée. Le temps d'attente sera variable entre périodes selon la charge du service : dans les conditions expérimentales, les faibles tailles de flotte ne permettront pas un abaissement drastique ?.

Composition physique du service : les véhicules autonomes et les opérateurs de sécurité, des équipements en bord de route pour la géolocalisation et le guidage pour faciliter la traversée des carrefours, des bornes de stationnement, le dépôt-atelier et son personnel, le système informatique de supervision et gestion centralisée.

Commercialisation. Les services sont exploités à la demande, par des appels à des bornes spéciales qui marquent les stations. Dans les conditions expérimentales, la tarification n'est prévue que pour les services de taxis. L'information dynamique par une application mobile est en question – à examiner dans chaque cas.

Comme pour le service en zone rurale, la **production de service** se comptera en nombre de trajets servis et en distance parcourue par les passagers. On pourrait aussi considérer des indicateurs de l'accessibilité produite par le service : nombre d'utilisateurs distincts, vitesse commerciale moyenne des trajets.

L'économie du service reprend les formules du transport public urbain de personnes, avec des paramètres adaptés en fonction de la taille du véhicule et de leur coût de revient spécifique, des équipements d'assistance au parcours, du système de supervision. Chaque expérimentation investit totalement dans l'équipement spécifique de l'infrastructure et dans un système de supervision, pour une flotte réduite et sans guère de recettes : le subventionnement est crucial.

Impact social : sur des itinéraires à vitesse modérée et avec un temps d'attente significatif, la marche à pied constitue l'alternative modale de référence, tandis qu'un deux roues (vélo

ou trottinette, avec ou sans moteur) est un compétiteur sérieux – du moins pour leurs utilisateurs potentiels. Alors des navettes seront surtout utilisées en recours, par des personnes à mobilité réduite.

Sur les itinéraires plus longs pouvant être parcourus à des vitesses plus élevées, les navettes et les taxis pourront être utilisés en substitution au mode VP (si le stationnement est difficile, ou en l'absence de véhicule particulier).

Les temps d'attente, s'ils s'allongent, réduiront l'utilité du service pour les usagers. Les interactions avec le reste du trafic dépendront du milieu de circulation : la variété des expérimentations permet de tester l'insertion parmi les circulations douces autant que le comportement en trafic mixte sur la voirie ordinaire.

L'impact environnemental dépend des alternatives modales de référence. Quand celles-ci sont des circulations douces, les véhicules autonomes même électriques n'apportent pas de gain environnemental. En revanche, quand le mode alternatif est une automobile thermique, le service est avantageux à condition d'être suffisamment mutualisé pour amortir l'impact environnemental de la fabrication du véhicule.

Aspect institutionnel. Le pilotage des diverses expérimentations révèle les intérêts des acteurs économiques et institutionnels : les grands opérateurs du transport public urbain de voyageurs sont très mobilisés (Ratp, Transdev, Kéolis), ainsi que le constructeur automobile Renault pour étendre son offre aux services de transport, et des collectivités locales (dans ENA, y compris Toulouse Oncopole).

Particularités signalées :

- Les circuits courts draineront surtout des usages spécifiques : principalement des personnes à mobilité réduite au sens large, incluant des personnes portant des bagages, ou avec des jeunes enfants dans des poussettes. Sur le terrain, il faudra les accueillir spécifiquement.
- Dans l'évaluation des expérimentations, veiller à segmenter la demande pour analyser les différents ressentis.
- Désagréger aussi selon la taille du parcours, car elle dimensionne l'intérêt du service rendu.
- L'articulation aux stations de TC structurant, mode ferré ou bus à haut niveau de service, est une fonction certes désirable mais soumise à des paradoxes. Les usagers du mode structurant attendent des solutions de rabattement efficaces, sans attente ; or leur nombre même, au sortir d'un train, risque d'être hors de proportion avec la contenance d'une navette. Les risques de frustration ne peuvent être contenus que par un système de réservation et d'information dynamique fournie suffisamment en amont.
- L'interopérabilité entre navettes des différents constructeurs sera testée dans plusieurs expérimentations. D'autres expérimentations mutualiseront des équipements de bord de route entre plusieurs catégories de véhicules, navettes ou taxis.

Tableau 1 : Expérimentations de navettes autonomes en milieu urbanisé dans le programme EVRA.

Site	Fonction de transport	Parcours	Flotte	Pilote
Sophia-Antipolis	Entre stations de BHNS et zone d'activités	1 km	2 navettes de 15 places	(ENA) Commune Sophia-Antipolis
Nantes	Entre terminus de ligne T4 de tramway et aéroport de Nantes Métropole	2.4 km, site propre	3 ou 4	(ENA) Nantes-Métropole
Paris Rive Gauche	Quartier urbain dense, un hôpital, une station de métro	14 km	2 navettes, 4 voitures	(SAM) Ratp
Vincennes	Prolongement de ligne de bus, desserte de station de métro, traversée de bois	4.6 km dans le bois + 1.4 en urbain dense	3 Easymile et 2 Navya	(SAM) Ratp
St Rémy lès Chevreuse	(Ile-de-France) Entre gare terminus du RER B et un parking distant, via milieu rural	4.3 km	3 Easymile	(SAM) Ratp
Paris-Saclay	1/ navette autonome sur voie en site propre, entre plateau de Saclay et gare RER de Massy, en complémentarité horaire des bus 2/ transport à la demande sur campus, rabattant sur réseau de bus 3/ service de mobilité électrique et partagée de type VTC	Linéaire total d'environ 20 km Linéaire total d'environ 10 km Linéaire total d'environ 40 km		(SAM) Transdev et Renault
Rouen	1/ Renforcement de lignes de bus, 2/ Substitution d'une autre ligne de bus, 3/ Desserte à la demande du centre ville	< 10 km	1/ 6 navettes 2/ 6 navettes 3/ 4 voitures	(SAM) Transdev et Renault
Vichy	Courte ligne au bord du fleuve Allier	1.2 km en site réservé aux modes doux	1 navette	Transdev
Rennes	Ligne de desserte du campus Rennes 1, notamment en 2 lieux desservis par des bus structurants	2.6 km sur voies avec modes doux, plus 3.6 en trafic mixte	2 Navya et ensuite 2 Easymile	Kéolis
Clermont-Ferrand	Dans l'hypercentre, en correspondance avec tramway et lignes de bus	2.8 km en trafic mixte, desserte de site propre et rue piétonne	3 Easymile	Kéolis
Toulouse	Rabattement entre service médical et parking déporté	1 km, d'abord sur voie dédiée avec traverse carrefour, puis sur voie publique	1 Easymile	Oncopole Toulouse

5. Confrontation et discussion

Après avoir exploré qualitativement la notion de service de mobilité basé sur des véhicules autonomes, nous avons passé en revue les projets de services qui composent le programme d'expérimentation EVRA, en appliquant à chaque projet notre grille générique d'analyse.

Nous allons à présent tirer des enseignements d'ensemble, à partir de la revue des projets, par confrontation des différents cas. Notre démarche se veut à la fois critique et constructive.

5.1 Consistance : une amplification de l'automobile

Le principe de l'automobile est de rendre autonome la voiture par rapport à l'infrastructure. Le VA à délégation de conduite dépend davantage de l'infrastructure, et ce afin de tracer et de coordonner son mouvement : il dépend en plus des équipements en bord de route et d'une fonction de supervision (assurée par un opérateur de service, qu'il soit à bord ou déporté).

Le principe de la Voiture Particulière (VP) est de rendre autonome l'individu qui l'utilise. La délégation de conduite sur le réseau (cf. § 4.1) et pour le stationnement (cf. § 4.2) amplifie à l'évidence le mode VP.

Quant aux services mutualisation des navettes ou des taxis, ils élargissent la clientèle du mode automobile aux individus dépourvus de voiture ou de capacité de conduire. L'adoption de la motorisation électrique, et la conversion aux vitesses modérées, rendent ces véhicules tolérables en milieu très urbanisé, à des endroits où la voiture particulière à moteur thermique est bannie. Dit autrement, les véhicules partagés jouissent d'un accès accru aux lieux urbains.

5.2 Qualité de service : construire des protocoles d'usage

En mode VP, la facilitation de circulation et surtout la décharge du stationnement constituent des améliorations importantes de la qualité de service automobile.

Le mode d'automobiles partagées offre une qualité sensiblement différente du mode VP usuel : les itinéraires sont spécifiques et les conditions de circulation sont adaptées, modérées, urbanisées. Pour des personnes à mobilité réduite dépourvues de VP, disposer d'une automobile avec un siège disponible pour s'y asseoir et un coffre pour loger ses bagages, et ce en un point situé sur la voirie donc qui évite des parcours en dénivelé, procure une qualité proche du taxi et ce au prix des transports collectifs. L'avantage est évident sous réserve de conditions spécifiques :

- Primo, que le temps d'attente soit raisonnable,
- Secundo, que le protocole d'usage soit simple et connu à l'avance. Il importe d'harmoniser en ce sens les différents services.
- Tertio, que la cohabitation à bord du véhicule soit harmonieuse, dans un habitacle dont la taille limitée impose la proximité : un protocole spécifique d'ordre social est à construire à ce sujet.

5.3 Commercialisation : construire une stratégie de disponibilité et de priorisation, ainsi que des politiques de tarification et de fidélisation

La tarification du service est directe et évidente pour le valet de parking, comme pour un transport à la demande par taxi autonome ; ou seulement indirecte, via le prix du véhicule, pour la délégation de conduite en circulation sur le réseau magistral.

Pour les services de navettes, une tarification n'est pas prévue dans les projets d'expérimentation. Il y a à cela une bonne raison : comme les usages seront isolés et d'ordre local, mieux vaut simplifier la transaction en évitant de formaliser un protocole spécifique et une grille tarifaire. A terme, il faudrait associer les usagers récurrents au financement du service. En phase d'émergence, une question plus importante est d'assurer la disponibilité du service, et ce aux lieux d'expression de la demande et en limitant le temps d'attente.

La disponibilité effective sera d'autant plus fortement aléatoire que la taille de flotte sera plus limitée et que les demandes surviendront de manière simultanée. Il faudra gérer et maîtriser les variations aléatoires, afin d'offrir au demandeur des garanties suffisantes en matière de ponctualité et de fiabilité. Il conviendra d'informer en amont des événements potentiels et des niveaux de possibilité, d'offrir une fonctionnalité de réservation, et pourquoi pas la faire payer, que ce soit en argent ou en points de fidélité.

Il incombe à chaque opérateur de service partagé de prendre des dispositions en la matière, afin de développer son offre en adéquation au potentiel de demande.

5.4 Composition physique : assurer l'interopérabilité au plan technique et au plan social

Les différents services expérimentés dans EVRA mettent en œuvre des véhicules, des équipements fixes tels que des relais de transmission et des bornes interactives, et encore un système de supervision. Les équipements fixes sont destinés à interagir avec les véhicules concernés, selon un protocole d'interaction explicite qui est lui aussi destiné à être partagé.

La mobilisation des véhicules de plusieurs constructeurs, que ce soit sur réseau magistral ou pour des lignes de navettes, permettra d'implémenter des dispositifs interopérables.

L'interopérabilité est nécessaire aussi pour les protocoles d'usage : il faut harmoniser les modes d'emploi entre les différents services de navettes d'un genre donné. A cet égard, nous avons distingué le service en zone rurale (ENA – Cœur de Brenne) des autres services qui concernent des zones urbanisées et peuvent être articulés au transport collectif qui y est implanté.

5.5 Production de service : gérer la mutualisation

La mutualisation est implémentée à différents niveaux dans les systèmes de transport :

- dans une automobile, par la disposition des sièges et des portes,
- à cela s'ajoutent, dans un grand véhicule tel qu'un autobus ou un train, les espaces de circulation interne.
- dans les transports collectifs, la forme de ligne et le plan des stations structurent les montées et descentes des passagers.
- encore en TC, le gabarit du véhicule et la fréquence de service sont planifiés par ligne en rapport avec le flux de la demande.

- L'affectation entre plusieurs véhicules, des voies de quai pour les stationnements, ou des sillons ferroviaires, et si besoin la gestion dynamique.

Pour des systèmes de VA il faudra gérer la mutualisation :

- Partage en temps réel des équipements fixes et de la supervision,
- Gestion en temps réel de conflits potentiels d'usage, que ce soit pour les places à bord d'un véhicule, ou les places de stationnement et les chemins d'accès dans un parking (cf. pistes dans un aéroport).
- Il faudra expliquer aux passagers la gestion qui leur est appliquée : par exemple l'affectation à certaines places à bord, ou l'attente d'autres individus ayant réservé. Les passagers ne peuvent être traités comme des colis !

5.6 Economie : des modèles d'affaire à construire

Nous avons déjà évoqué, à propos de commercialisation, le besoin d'assurer la disponibilité et d'intégrer des degrés de priorité, entre autres pistes pour la tarification et la fidélisation. Le statut émergent du mode Navette Autonome, couplé à sa forte teneur en technologies, constituent une grande opportunité pour reconcevoir l'économie marchande du transport public en milieu urbain. Par client individuel, il est facile de comptabiliser les usages, et de tenir un « compte de service » qui pourra impliquer des sommes d'argent autant que des nombres de points, et ce pourquoi pas pour plusieurs types de points.

Un tel compte individuel de service pourrait être alimenté tant par son titulaire, que par une entreprise (employeuse ou sponsor, par exemple un commerce envers ses clients) ou encore par une collectivité au titre à la fois de sa politique sociale et de sa politique de mobilité.

Pour construire la rentabilité, les services rendus sont à envisager primordialement en mode B2C. Un principe simple est d'établir la « cote de rentabilisation » par véhicule selon un ou quelques indicateurs de production tel que le nombre de courses servies par jour.

En rapportant le coût de production total du service à l'ensemble des véhicules, on pourra mettre en rapport un coût unitaire de production avec un ou quelques niveaux d'activité, d'abord pour envisager des imputations aux usages, puis pour répartir un montant d'imputation entre un tarif commercial et un « shadow price » (valeur sociale) destiné à être supporté par la collectivité. Les investissements en infrastructure et en véhicules pourront être isolés dans le coût de production, afin de bénéficier de conditions spécifiques de financement.

Un tel raisonnement économique paraît simple à mener pour le service de valet de parking, ainsi que pour le robot de fret. D'autres services expérimentés répondent à des enjeux sociaux et économiques du territoire d'implantation : desserte de personnes isolées pour les navettes en Cœur de Brenne, acheminement de productions locales pour le robot de fret. Pour les services de navettes en milieu urbanisé, le modèle d'affaire sera certainement interdépendant : en relation tant avec l'économie locale des transports collectifs, qu'avec les performances sociales et environnementales du service de VA dans le territoire.

5.7 Impact social : des questions d'échelle

La création d'accessibilité et la qualité de service sont les deux avantages des services pour les usagers. Le besoin de financement public est un inconvénient pour les contribuables.

Pour les autres parties prenantes :

- l'impact local sur les riverains est d'ordre environnemental, il dépend des substitutions modales, cf. §4.5.
- l'impact sur le reste du trafic est marginal tant que la taille de flotte reste limitée à quelques unités. Mais un fort développement quantitatif induirait des conséquences massives, d'une part directe sous la forme de gênes entre mobiles, d'autre part indirectes par report modal et diminution du reste du trafic (allant potentiellement jusqu'à la démotorisation de certains et donc des allègements de stationnement).
- la réservation d'une file de circulation, ou même seulement d'une place de stationnement, peut exercer des conséquences notables sur le trafic local de tous les modes. A anticiper et accompagner !

5.8 Impact environnemental : des questions d'échelle

La circulation locale à vitesse modérée d'un véhicule autonome et électrique est moins émissive que celle d'un véhicule thermique, que ce soit en polluants atmosphériques, en bruit ou encore en gaz à effet de serre (aux conditions 2020 du mix électrique en France). La mutualisation du véhicule autonome par plusieurs occupants et l'évitement des déplacements de plusieurs autres véhicules, qu'ils soient thermiques ou électriques, procure aussi des gains, en proportion directe avec le nombre d'occupants.

Par rapport à des véhicules électriques plus petits que sont des vélos et des trottinettes à moteur, le bilan environnemental joue en sens inverse, même si le nombre d'occupants du véhicule autonome est élevé, puisque de toute manière le nombre de places est limité.

En revanche la mutualisation reconfigure les effets indirects sur le reste du trafic : elle facilite la circulation des autres entités mobiles, par rapport à un certain nombre de deux roues circulant individuellement. Dans le scénario d'un fort développement quantitatif du VA, les conséquences massives signalées sur le fonctionnement du trafic se répercuteront directement au plan environnemental.

5.9 Aspect institutionnel : développer des réseaux

La conception de services de mobilité autonome est un sujet encore neuf, objet surtout de travaux de recherche (Berrada, 2019, Vosooghi, 2019). Les expérimentations du programme EVRA se situent au stade de la préfiguration, en amont de l'émergence.

Les potentialités relevées paraissent prometteuses pour certains usages, pour les promoteurs des services et plus largement pour la collectivité. Afin d'affermir ces potentialités, des dispositions sont à prendre entre les différents acteurs concernés, en termes d'institutions et de contrats.

Du côté de la production, une filière industrielle prend corps progressivement, avec :

- des opérateurs de services de transport, pour les personnes et aussi pour le fret.
- des constructeurs d'automobiles et de navettes, fournisseurs de véhicules.

- des équipementiers pour les véhicules, ou pour les infrastructures, ou pour des systèmes de supervision (ex. Valéo pour le service de valet de parking).
- des aménageurs-installateurs, ex. Eiffage pour le service de navettes en Cœur de Brenne.
- des fournisseurs de consommables (ex. EDF pour l'alimentation en énergie).

On reconnaît là les étages bien connus des systèmes de transport. La principale originalité concerne le système de supervision ⁽⁶⁾.

En revanche, la fonction de commercialisation et la fonction Economie ne semble pas avoir encore de champions industriels. Il y a là une carence à combler – au moins dans l'écosystème industriel français.

Du côté des usagers, à l'ère digitale les impressions personnelles se partagent sur le web et les opinions se propagent rapidement. La constitution d'une communauté d'usagers des services de mobilité à délégation de conduite est à entreprendre et à encourager. Un transfert d'expérience de la part d'associations bien établies : automobiles-clubs et associations d'usagers des transports publics, serait précieux.

Du côté des collectivités, les projets de services EVRA révèlent des implications fortes de communes, groupements de communes et parfois d'établissements publics (Toulouse Oncopole). Les bénéfices attendus vont depuis la fourniture d'accessibilité et de services aux individus et aux entreprises, jusqu'à l'effet d'image pour la ville (accueillante et promotrice de l'innovation technologique), en passant par l'amélioration de l'environnement urbain et la satisfaction des résidents. La sensibilité à ces différents enjeux est une disposition favorable. Il sera bon non seulement de mener l'expérimentation, mais aussi de projeter le développement potentiel du service à l'échelle du territoire. Il s'agira de concevoir des configurations de service qui permettent des effets de club, de réseau et de système. Le GART paraît un foyer naturel pour mutualiser les expériences et les scénarisations prospectives, et pour co-concevoir les conditions de commercialisation et de tarification propices à l'essor des services.

6. Conclusion

Nous avons présenté un modèle qualitatif de l'automobilité comme un système articulant Véhicule, Infrastructure, Service et Usages. Nous l'avons décliné en deux versions, l'une pour le mode « originel » à conduite humaine, l'autre pour le mode émergent à conduite autonome. La délégation de conduite s'interprète comme une recomposition : des interactions de type Usages & Véhicules, et Usages & Infrastructure, deviennent des interactions Véhicule & Infrastructure, Véhicule & Service ou Infrastructure & Service.

De ce modèle qualitatif nous avons tiré une matrice d'analyse en neuf composantes : consistance du service, qualité de service, commercialisation, composition physique, production de service, économie, impact social, impact environnemental, aspect institutionnel.

⁶ Il est révélateur que Valéo, entreprise industrielle, se positionne justement pour le service où la création de valeur est la plus évidente

Nous avons appliqué cette matrice pour analyser les différents services de mobilité autonome projetés dans le programme d'expérimentation EVRA, rangés en cinq familles : (1) délégation de conduite sur réseau magistral, (2) valet de parking, (3) robot de fret, (4) navettes autonomes en zone rurale, (5) navettes autonomes en milieu urbanisé. La matrice d'analyse a permis de faire ressortir les traits marquants de chaque type : parmi ces traits, beaucoup sont bien identifiés par les concepteurs et les promoteurs des services projetés, mais d'autres ne sont pas envisagés, en particulier la « commercialisation ».

Enfin, pour chaque composante de la grille nous avons synthétisé les résultats d'analyse des différents services. Il en ressort un constat clair : ces services de mobilité autonome sont encore au stade de la préfiguration, en amont même de l'émergence. Les préfigurations qui font l'objet des expérimentations ont une haute teneur technologique. Pour autant, bien des aspects restent à concevoir en matière de protocoles d'utilisation, de stratégies de disponibilité et de priorisation, de politiques de tarification et de fidélisation. Or, à terme ces aspects seront déterminants tant pour la fréquentation des services que pour leurs revenus commerciaux, et par conséquent pour leur potentiel de développement. Dit autrement, l'intelligence technico-économique et l'intelligence socio-politique de ces systèmes restent largement à développer.

Dans le programme EVRA-SAM, une partie des travaux seront consacrés à simuler une extension large des services de mobilité autonome : c'est la notion de « passage à l'échelle » afin de modéliser des effets de système et d'en estimer les conséquences potentielles. De telles projections gagneront à être soumises à des conditions de cohérence :

- telles que le « budget temps » passé en déplacement par un individu dans une journée, ou le « budget de fatigue », ou le « budget financier ».
- ainsi que l'affectation physique des véhicules aux besoins des clients, ses conséquences sur la disponibilité effective du service selon le lieu et l'horaire ;
- ou encore, par service, la contrainte d'équilibre budgétaire entre des ressources et des emplois.

Remerciements. A Patrick Péлата (*Méta Consulting*) et Philippe Vézin (*Ifsttar*) pour leurs intuitions éclairantes sur la délégation de conduite et la gestion de systèmes de véhicules autonomes. A Jean Grébert, Yann Chazal, Guillaume Tilquin et Patrick Vergelas (*Renault*) pour des discussions stimulantes sur les éco-systèmes de mobilité à base de véhicules électriques et aussi de véhicules autonomes. Aux initiateurs et aux concepteurs du projet EVRA-SAM, en particulier Nadège Faul (*VéDéCoM*) et Jean-François Sancerin (*PFA*).

7. Références

Ademe (2018) *Appel à projets EVRA : Expérimentation du Véhicule Routier Autonome*. Document principal, 18 pages.

Andreasson, I., Leurent, F. and Rossetti, R. (2016). *Future Developments and Research Topics*. In Gentile, G. & Noeckel, K. (eds): *Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems*, Springer Tracts on Transportation and Traffic, Vol. 10: 561-641.

Berrada J. (2019) *Technical-economic Analysis of Services based on Autonomous Vehicles*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, dirigée par F. Leurent, 254 pages.

Ifsttar (2019) *Projet ENA : expérimentations de navettes autonomes*. Dossier de presse, 14 pages, septembre.

Leurent F. (2013) *L'équipement territorial au prisme de l'éco-conception : quels principes et quelles méthodes pour l'aménagement et le transport ?* In Peuportier B. (ed) *Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures*, Chapitre 4, pp. 57-78. Presse des MINES.

Leurent F., Sadéghian S., Thébert M., Windisch E. (2013) *Les conditions économiques, matérielles et sociales de l'équipement des ménages en voiture électrique*. La Revue du CGDD : Vers une mobilité automobile durable ?, juin, 69-74.

Leurent F. (2018) *Numérique et mobilité : technologies et potentialités pour les acteurs et les organisations*. In Landau B. & Diab Y. (dir.), « Le nouveau monde de la mobilité », Presses des Ponts, Paris, pp. 127-139.

Leurent F., Haxaire O. et Lesteven G. (2018) *La Smart Mobility : un paysage en voie d'aménagement*. Chapitre 21 dans Peuportier B., Leurent F. et Roger-Estrade J. (coord.) « Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures, tome 2 ». Presses des Mines, Paris, pp. 487-540.

MTES, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2019) *Développement des véhicules autonomes : l'Etat s'engage dans 16 nouvelles expérimentations*. Dossier de presse, avril, 9 pages.

https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/9918029_D%C3%A9veloppement-VA_Vdef2.pdf

Projet SAM (2019b) *Expérimentations Transdev*. Document technique, 8 pages.

Sadeghian S., Leurent F., Lucas D. (2013) *Du véhicule électrique au système d'électro-mobilité : une composition par re-conception et innovation*. Revue TEC n°220, pp. 8-13, Décembre 2013.

Vosooghi R. (2019) *Shared Autonomous Vehicle (Robot-Taxi): Service Design, Modeling, and Simulation*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, dirigée par J. Puchinger et M. Jankovic, 130 pages.