



HAL
open science

Les navettes autonomes, un nouveau mode de transport en commun : la place et le rôle des navettes autonomes au sein des services et des réseaux de transport en commun

Rodolphe Murat

► To cite this version:

Rodolphe Murat. Les navettes autonomes, un nouveau mode de transport en commun : la place et le rôle des navettes autonomes au sein des services et des réseaux de transport en commun. Architecture, aménagement de l'espace. 2017. dumas-01591431

HAL Id: dumas-01591431

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01591431v1>

Submitted on 21 Sep 2017

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.

Les navettes autonomes, un nouveau mode de transport en commun

La place et le rôle des navettes autonomes au sein des services et des réseaux de transport en commun



Figure 1 : Navette autonome Navya Arma à Lyon. Source : ITespresso.fr

Rodolphe Murat

Année universitaire 2016/2017

Mémoire réalisé sous la direction de Monsieur Gilles Novarina

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont été présentes durant la réalisation de ce projet de fin d'études.

Merci tout d'abord à la société TTK (Transport Technologie – Consult Karlsruhe GmbH) de m'avoir accueilli pendant mon alternance de deuxième année de Master. Le stage que j'ai effectué a été pour moi une expérience très enrichissante qui m'a permis de découvrir les métiers du conseil dans le domaine de la mobilité tout en me formant à l'utilisation de nombreux logiciels professionnels.

Merci à Sarah Moraillon, ma tutrice au sein de la société TTK, d'avoir été présente tout au long de mon stage, d'avoir pris sur son temps de travail afin de répondre à mes nombreuses questions, de m'avoir aidé dans la réalisation de mes missions et d'avoir partagé son expérience professionnelle avec moi.

Merci à tous les membres de la société TTK pour leur accueil, leur sympathie et le temps qu'ils m'ont consacré.

Merci aux professionnels du CEREMA, du Grand Lyon et de Kéolis Lyon d'avoir accepté de me rencontrer et d'échanger sur la thématique des transports autonomes.

Merci à Gilles Novarina, mon directeur de mémoire, d'avoir été présent tout au long de mon alternance et de m'avoir aidé et conseillé dans la réalisation de mon projet de fin d'études.

Merci à l'ensemble des professeurs de l'Institut d'Urbanisme de Grenoble pour ces deux années de Master qui ont été très enrichissantes et qui ont confirmé mon fort intérêt pour les domaines de l'urbanisme et des transports.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis de m'avoir soutenu tout au long de ma formation et dans la réalisation de mon projet de fin d'études.

Sommaire

Contenu

Introduction	1
I- Historique du développement des automatismes dans le domaine des transports en commun...5	
1.1 Les transports en commun automatiques guidés.....5	
1.2 Les transports autonomes non guidés.....10	
II- Les automatismes dans les transports en commun d'aujourd'hui	15
2.1 Définition de la mobilité autonome.....15	
2.2 Définition d'une navette autonome	17
2.3 Les principales technologies embarquées dans les navettes autonomes de transport en commun et leur fonctionnement	19
2.4 Le marché des navettes autonomes, modèles et constructeurs	22
III- Navettes et bus autonomes, plusieurs usages envisageables	26
3.1 Utilisation des navettes autonomes pour des déplacements sur de longues distances dans une aire urbaine	27
3.1.1. Une solution pour couvrir les segments du premier ou du dernier kilomètre en milieu peu dense et en lien avec une ligne de transport en commun structurante	27
3.1.2 Une solution permettant d'assurer la totalité du déplacement de l'utilisateur et utilisée en remplacement des services existants	31
3.2 Utilisation des navettes autonomes pour des déplacements de proximité.....35	
3.2.1 Une solution pour répondre à des besoins de déplacement de proximité dans des secteurs où les transports sont peu attractifs	35
3.2.2 Une solution pour les services à la demande	39
3.2.3 Une solution pour la desserte de sites fermés, publics ou privés	42
3.3 Une solution pour les déplacements techniques, en-dehors des périodes d'exploitation	45
IV- Les expérimentations de navette autonome.....47	
4.1 Les expérimentations de navette autonome, des sites fermés aux espaces urbains	47

4.1.1	Cadre juridique des expérimentations : des espaces fermés aux espaces ouverts.....	47
4.1.2	Des expérimentations qui fleurissent en Europe.....	50
4.2	Présentation de deux cas d'expérimentation de navette autonome	52
4.2.1	Lyon, une navette dans la <i>smart city lyonnaise</i>	52
4.2.2	Sion, une navette dans le centre ancien	59
V-	Synthèse et enseignements apportés par les premières circulations de navette autonome	69
5.1	Les bénéfices apportés par la mise en place de navettes autonomes	69
5.1.1	Les navettes autonomes, un mode de transport en commun qui s'adapte aux différents besoins de mobilité	69
5.1.2	Un mode qui permet de limiter les coûts d'exploitation des transports en commun	70
5.1.3	Un mode qui peut permettre de limiter la place de la voiture dans certaines situations en rendant les transports en commun plus attractifs	71
5.2	Les difficultés à surmonter	73
5.2.1	Des technologies récentes en cours de perfectionnement	73
5.2.2	Des coûts d'acquisition élevés et des coûts de maintenance et d'exploitation qui restent à préciser.....	75
5.2.3	Une législation sur la circulation routière à faire évoluer	77
5.2.4	Des services qui viennent, dans certaines situations, concurrencer les modes actifs ou les taxis	78
	Conclusion.....	80
	Table des figures	82
	Liste des acronymes	85
	Bibliographie	87
	Annexe	90
	Annexe n°1 : compte-rendu d'entretien - CEREMA - 12 juillet 2017	90
	Annexe n°2 : compte-rendu d'entretien - Kéolis Lyon - 21 juillet 2017	93
	Annexe n°3 : compte-rendu d'entretien - Métropole de Lyon (Grand Lyon) - 7 août 2017	97
	Annexe n°4 : les modalités d'exploitation des services assurés par des navettes autonomes en fonction des territoires desservis	99

Introduction

Les espaces urbains font face à de nombreuses problématiques causées par l'hégémonie de la voiture sur les autres modes de déplacement. La voiture est le mode de déplacement principal sur le territoire national. En 2010, selon les chiffres de l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques), 70 % des actifs de France métropolitaine utilisent leur voiture pour aller travailler. La part modale de la voiture se maintient ou augmente dans la majorité des territoires les moins bien desservis par les transports en commun. A l'inverse, dans les grandes agglomérations bien desservies par la voiture, son usage est en recul. L'INSEE observait entre 1999 et 2010, par le biais des recensements de population effectués pendant cette période, que la part des déplacements en voiture avait progressé de six points dans les espaces situés en dehors des aires urbaines. Cette progression de l'usage de la voiture fait baisser la part des déplacements effectués en deux-roues ou à pied. Pour les aires urbaines, l'INSEE observait le phénomène inverse avec une part des déplacements en voiture qui avait reculé de trois points au profit des transports en commun.

Cette domination de la voiture génère de nombreuses problématiques qui amènent à répondre à de nombreux défis. L'usage important des modes de déplacement individuels motorisés et la faible occupation des véhicules (le taux moyen d'occupation d'une automobile est aujourd'hui de 1.06¹) participent à l'augmentation du nombre de voitures en circulation sur les infrastructures routières. Cela crée une forte congestion des axes aux heures de pointe. Cette congestion détériore les conditions de déplacement (allongement des temps de parcours, forte variabilité des temps de trajet en fonction des heures, ...) et a un coût économique important pour la société. Selon Inrix (une société d'info-traffic américaine qui a publié une étude prévisionnelle sur l'évolution des coûts des embouteillages en Europe et aux Etats-Unis d'ici 2030), le coût de la congestion routière, en France, atteindrait 46 millions d'euros par jour, soit 17 milliards par an².

La prédominance de la voiture individuelle génère une forte pollution atmosphérique au sein des aires urbaines de notre pays. La France est régulièrement frappée par d'importants épisodes de pollution atmosphérique où l'on retrouve, la plupart du temps, des particules fines (les PM10, de dimensions inférieures à 10 micromètres, ainsi que les PM2,5, de dimensions inférieures à 2,5 micromètres), du dioxyde de soufre (SO₂), du dioxyde d'azote (NO₂) et de l'ozone (O₃). Ces épisodes

¹ROUGEAU, F. (2016). La voiture peut-être plus que le véhicule de notre individualisme. *Les Echos*

² GRADT, J. (2014). Embouteillage en France : une facture estimée à 17 milliards d'euros par an. *Les Echos*

ont des conséquences importantes sur la santé publique et la forte concentration de certains polluants participe au changement climatique. Au niveau des particules fines, le seuil critique de concentration de ces particules dans l'air, qui s'élève à 80 µg/m³, est dépassé plusieurs fois par an dans les grandes agglomérations.

La voiture est également une source d'insécurité routière. Selon le baromètre de juin 2017 de l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR), 329 personnes ont perdu la vie sur les routes de France métropolitaine sur le mois de juin 2017, contre 285 pour le mois de juin 2016, soit une hausse de 44 personnes tuées et une augmentation de 15.4%. En 2016, 3 477 personnes ont perdu la vie dans un accident de la route en France métropolitaine. Un grand nombre d'accidents de la route est dû au comportement des usagers qui peuvent avoir des conduites à risque ou ne pas respecter le code de la route. Les vitesses parfois élevées et au-dessus des limites autorisées, ainsi que la fatigue, la baisse de la vigilance et la somnolence, peuvent être des facteurs d'accidents.

La voiture individuelle est source de nuisances. Ces nuisances peuvent être sonores, avec le bruit des moteurs, du roulement des pneus sur la chaussée et des avertisseurs sonores, olfactives, avec notamment les odeurs de carburant, ou visuelles, avec la place importante accordée à la voiture sur l'espace public et la détérioration du paysage urbain.

Enfin, la place accordée à la voiture en ville est très importante. Selon un article des Décodeurs du journal Le Monde, la moitié des 2 800 hectares de voies publiques de Paris est occupée, soit par la circulation automobile, soit par les parkings publics. La voiture occupe 50% de l'espace public alors qu'elle ne représente que, toujours selon les chiffres des Décodeurs, 13% des déplacements des parisiens. La voiture individuelle monopolise l'espace au détriment des transports en commun et des modes actifs et fait de l'espace public un espace de circulation et de stationnement au dépend des autres activités comme la promenade, la contemplation ou le jeu.

Les politiques publiques ont aujourd'hui pour objectif de réduire la place de la voiture pour rééquilibrer la place de chaque mode, diversifier les usages qui sont faits de l'espace public et réduire les nuisances qui sont provoquées par ce mode de déplacement (pollution, insécurité routière, bruit, ...). De nombreuses solutions existent pour réduire les flux de véhicules et réinventer les transports.

Les villes et les agglomérations peuvent installer des péages urbains pour diminuer le nombre de véhicules qui rentrent dans le cœur d'une agglomération, à l'image de Londres ou de Milan,

renforcer leur réseau de transport en commun, à l'image de Grenoble et de son réseau maillé de tramway, développer les modes actifs en réaménageant les espaces publics en faveur de la marche et du vélo, à l'image de la Métropole de Lyon et de son Plan d'Actions pour les Mobilités Actives (PAMA), ou encore piétonniser certains quartiers, à l'image d'une partie de l'ellipse insulaire de Strasbourg.

Une des solutions actuellement testée par les métropoles du monde entier pour réduire la part du trafic automobile et les nuisances qui l'accompagnent est d'expérimenter la mise en place de véhicules autonomes pour assurer des dessertes en transport en commun. Les véhicules autonomes représentent une solution innovante qui suscite un certain engouement de la part des collectivités et qui pourrait être envisagée pour répondre à des besoins dans le domaine des transports collectifs.

Les véhicules autonomes de transport en commun prennent la forme de navettes autonomes pouvant accueillir jusqu'à quinze personnes et circulant à une vitesse maximale de 45 km/h si elles ne sont pas bridées. Ces navettes autonomes peuvent être un outil permettant de répondre aux problématiques de mobilité et de pollution des villes en assurant des services de transport en commun.

Les navettes autonomes ont été mises en avant lors du salon *Transports publics* à l'automne 2015. Depuis cette date, les annonces d'expérimentations se multiplient et chaque opérateur de transport public se place sur la thématique du transport en commun assuré par des navettes autonomes. Des navettes ont notamment été testées, ou sont en cours de test, à Paris, sur le pont Charles de Gaulle, à Lyon, dans le quartier de La Confluence, ou à Sion, dans le centre-ville de cette ville du canton du Valais, en Suisse.

En France, le développement des navettes autonomes de transport en commun est assuré via le Plan de *La Nouvelle France Industrielle*. Ce plan a été lancé en septembre 2013 par le gouvernement français et a pour objectif de promouvoir une réindustrialisation qui permette de répondre à de nouveaux besoins et à de nouveaux marchés, que ce soit en France ou à l'export. Le pilotage du volet de *La Nouvelle France Industrielle* qui concerne les transports en commun a été confié à la RATP. C'est à la suite de la mise en place de ce plan qu'a été décidée une révision de la législation sur la circulation routière avec, notamment, l'adoption de l'Ordonnance n° 2016-1057 du 3 août 2016 relative à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques. Cette ordonnance permet la circulation des véhicules autonomes, à des fins d'expérimentation, sur la voie publique.

Ce mémoire aborde les questions du développement des véhicules autonomes dans le domaine des transports en commun et de leur insertion dans les réseaux.

Il présente dans un premier temps la question du développement des automatismes dans les transports en commun par le biais d'un historique des modes de transport automatiques et des différentes technologies mises en place au cours des dernières décennies.

Dans une deuxième partie, ce mémoire définit les termes de mobilité autonome et de navette autonome puis présente la situation actuelle avec les différents niveaux d'automatismes, les constructeurs et leurs véhicules.

La troisième partie présente les différentes situations où les navettes autonomes peuvent être utilisées pour mettre en place des services de transport collectif, ainsi que les avantages et les inconvénients de l'utilisation de ces véhicules dans chacune de ces situations.

La quatrième partie aborde les questions des expérimentations et de la circulation des véhicules autonomes et présente, en détail, les expérimentations de Lyon et de Sion.

Enfin, pour conclure ce mémoire, la cinquième et dernière partie permet de faire le point sur les bénéfices et les inconvénients des navettes autonomes dans le domaine des transports en commun.

I- Historique du développement des automatismes dans le domaine des transports en commun

Dans le domaine des transports collectifs, les automatismes sont une réalité ancienne. Ceux-ci se sont largement développés au niveau des modes guidés, sur des réseaux de métro ou des transports hectométriques³. Les réalisations sont bien plus rares et bien plus récentes du côté des véhicules routiers autonomes non guidés. Cette première partie du mémoire permet de retracer l'histoire des automatismes dans le domaine des transports en commun et leur évolution au fil du temps.

1.1 Les transports en commun automatiques guidés

Les premières expérimentations d'automatismes guidés dans le domaine des transports en commun eurent lieu en 1951. A cette époque la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) souhaitait améliorer la ponctualité de ces lignes de métropolitain tout en allégeant le travail des conducteurs. Ces tests furent effectués avec le prototype du matériel sur pneumatiques MP 51 sur un ancien raccordement, entre deux lignes, qui n'était pas emprunté par des métros circulant en service commercial. Le métro expérimenté était alors en conduite semi-automatique, un conducteur était présent à bord pour vérifier le bon déroulement de l'exploitation et s'occuper de l'ouverture et de la fermeture des portes. Dans le cadre de ce test, la voie était équipée d'un tapis de pilotage automatique situé entre les rails et posé sur les traverses. Ce tapis permettait de donner les vitesses aux métros et était composé de deux câbles parallèles qui jouaient le rôle d'antennes émettrices. Les deux câbles se croisaient à intervalle régulier, ce qui avait pour effet d'inverser le champ électrique capté par les récepteurs installés sur le métro. A chaque croisement, le chronomètre du système automatique était remis à zéro et comptait le temps écoulé pour atteindre l'inversion du champ électrique suivant. Le temps mesuré était ensuite comparé au temps théorique que le train devait mettre pour relier ces deux croisements de câble. Si le temps mesuré était inférieur au temps théorique, le métro ralentissait, et, à l'inverse, si le temps mesuré était supérieur au temps théorique, le train accélérail. Ce prototype circula en mode semi-automatique et en service commercial du 13 avril 1952 au 31 mai 1956 sur une courte section de ligne du réseau souterrain parisien.

³ « [...] un transporteur hectométrique est un moyen de transport qui permet de déplacer des voyageurs sur des distances comprises entre 100 m et 1 km. ». PATIN, P. (1989), Y a-t-il un « créneau » pour les transporteurs hectométriques ? *Culture Technique* (n°19)



Figure 2 : Une motrice MP 51 conservée au musée des transports urbains, interurbains et ruraux à Chelles (77). Ce musée est géré par l'Association du Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux (AMTUIR).
Source : Wikipédia

Une dizaine d'années plus tard, la RATP choisit la ligne n°11 de son réseau de métro pour expérimenter à grande échelle le système de pilotage semi-automatique inventé dans les années 1950. Deux rames MP 55 furent équipées de ce système et circulèrent sur la ligne n°11 à partir de 1967. En 1969, après deux années d'expérimentation concluantes, l'ensemble du parc des rames MP 55 est équipé. En 1971, le pilotage semi-automatique est mis en place sur la ligne n°4 avec un système totalement électronique et plus performant. Le système se généralisa ensuite aux autres lignes du réseau du métropolitain parisien.

Les avancées technologiques des années 1960 permirent de mettre en place les premiers transports en commun totalement automatisés. Ces transports en commun automatisés faisaient partie de la catégorie des transports hectométriques. Le premier transport hectométrique automatisé développé est un système léger par rail. Celui-ci a été présenté dans le pavillon Ford Magic Skyway de la Foire Internationale de New York en 1964. La mise en place de transports hectométriques automatisés et les avancées technologiques ont ensuite permis de développer des systèmes de transport automatisés plus performants et plus capacitaires. En France, les recherches qui portaient sur le transport automatisé ont amené au développement des systèmes ARAMIS et VAL.

Le système ARAMIS, pour Agencement en Rames Automatisées de Modules Indépendants en Stations, est un projet de transport en commun guidé et en site propre mené par l'Etat, la RATP et l'entreprise Matra Transport à partir de 1972 et abandonné, à l'état de prototype, en 1987. A l'origine, le projet prenait la forme d'un Personal Rapid Transit (PRT)⁴. Le système ARAMIS était alors

⁴ BULLIS, K. (2009), Personal Rapid Transit Startup. *MIT Technology Review*

un transport en commun en site propre de type « ascenseur horizontal ». Il était équipé de petites cabines sur pneumatiques qui circulaient automatiquement. La gestion de la circulation était effectuée à l'aide d'un système informatique de pilotage automatique. Par la suite, le projet a évolué vers la mise en place d'un mini-métro intégralement automatique et de gabarit plus réduit que le VAL. Le système ARAMIS n'a cependant jamais été exploité commercialement mais les différents essais réalisés ont permis de faire avancer la recherche sur les automatismes dans le domaine des transports. Aujourd'hui, il existe peu de systèmes de PRT dans le monde. Le premier PRT a été mis en service en 1975 à Morgantown aux Etats-Unis



Figure 3 : ARAMIS, un transport guidé et automatique équipé de petites cabines pneumatiques. Source : [blog Social Media Sociology](#)

Le VAL, pour Villeneuve-d'Ascq - Lille ou Véhicule Automatique Léger, est un métro automatique. Le concept du VAL est apparu en 1968 avec comme objectif de développer un transport en commun ayant une vitesse commerciale élevée et une fréquence plus importante pour des lignes aux niveaux de fréquentation plus faibles. L'ambition du VAL est de permettre aux autorités organisatrices de transport de disposer d'un mode de transport fiable et plus économique, notamment par l'absence de conducteur. Les réflexions autour du VAL ont été poursuivies par le professeur Gabillard, membre

Un PRT est un système de transport guidé ou non guidé qui combine les facilités d'usages et le confort de la voiture individuelle avec les avantages environnementaux procurés par les systèmes de transport en commun. Les véhicules automatisés, généralement électriques, qui équipent les PRT sont conçus pour transporter jusqu'à vingt personnes et effectuent des trajets qui peuvent varier en fonction du lieu de destination des usagers.

de l'Université de Lille III, qui travaillait sur la mise en place d'un mode de transport en commun automatique léger et sur l'utilisation des systèmes électromagnétiques. Il déposa un brevet en 1971 pour sécuriser l'utilisation du terme VAL et travailla avec les équipes des laboratoires de l'Université de Lille I et de l'Institut Industriel du Nord.

Dans le même temps, la Communauté Urbaine de Lille lança un appel d'offres pour un système de transport en commun à forte fréquence et avec une amplitude de fonctionnement de 20 heures par jour, pour un investissement inférieur à 15% par rapport à un métro classique et avec un coût d'exploitation réduit de 30%.⁵ Cet appel d'offres est remporté par l'entreprise Matra, en coopération avec la Compagnie Industrielle de Matériel de Transport (CIMT) et la Compagnie Electro-Mécanique (CEM). Ce groupement travailla en collaboration avec le professeur Gabillard et les équipes de recherche de l'Université Lille I et de l'Institut Industriel du Nord pour développer un prototype de VAL en 1973. Il assura, également, les essais du VAL, d'abord en laboratoire puis sur des voies d'essai, de juin 1973 à septembre 1974. A l'issue de ces essais, le principe d'un métro automatique léger sans conducteur était validé. A l'automne 1977, la mise en place d'un métro automatique léger était actée avec la commande de 38 rames de deux voitures avec roulement pneumatique aux sociétés Matra et à la Compagnie Industrielle de Matériel et de Traction (CIMT). Les premières rames de présérie furent testées en pilotage manuel, puis en pilotage automatique, en coopération avec les chercheurs de l'Université des Sciences et Technologies entre le mois de septembre 1979 et le début de l'année 1981.

Le VAL de Lille et sa première ligne furent inaugurés le 25 avril 1983. Les dispositifs fonctionnant selon le principe du VAL sont situés essentiellement en Asie et en Europe. Le développement du VAL dans le monde fut cependant modeste, au regard des plus de 400 réseaux de tramway en fonctionnement dans le monde, et ce mode de transport connu un développement plus important dans le domaine des transports hectométriques.

⁵ *TransportUrbain*. Lille : premier métro automatique du monde [en ligne] (article publié en 2013)
<http://transporturbain.canalblog.com/pages/lille---premier-metro-automatique-du-monde/27162547.html>



Figure 4 : Première génération du VAL de Lille. Source : Flickr - Franky De Witte

Le 11 décembre 1992 est mis en place la première ligne de métro automatique à grand gabarit du monde à Lyon (la ligne avait été mise en service en mode manuel un an auparavant, le 4 septembre 1991). Cette ligne porte le nom de MAGGALY, pour Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise, et a été construite par un groupement industriel qui réunissait Alstom, pour la partie matériel roulant, Matra et Jeumont-Schneider, pour le pilotage automatique, et CSEE, pour le poste de contrôle et de commande.

MAGGALY est mis en service à une époque où les automatismes sur les métros sont bien maîtrisés avec le service du Kobe Port Island Line (1981, Japon), le VAL de Lille (1983), le Skytrain de Vancouver (1986, Canada) et le VAL de l'aéroport d'Orly (1991, Orlyval).

La ligne possède cependant ses propres spécificités car elle combine un pilotage automatique avec un système de cantons mobiles déformables. Les lignes ferroviaires sont découpées par canton, chaque canton ne pouvant accueillir qu'un seul train pour éviter les risques de collision. La majorité des cantons sont fixes et disposent d'une signalisation verticale qui avertit les conducteurs de la présence ou de l'absence d'un train dans le canton suivant. Les cantons mobiles déformables, au contraire des cantons fixes, ne disposent pas de signaux lumineux. Dans un canton mobile déformable, le canton est composé d'une portion à l'arrière et d'une portion à l'avant du train. La taille du canton est recalculée en permanence et elle dépend de la vitesse de la rame car elle englobe la distance de freinage d'urgence de la rame, ainsi qu'une marge de sécurité.

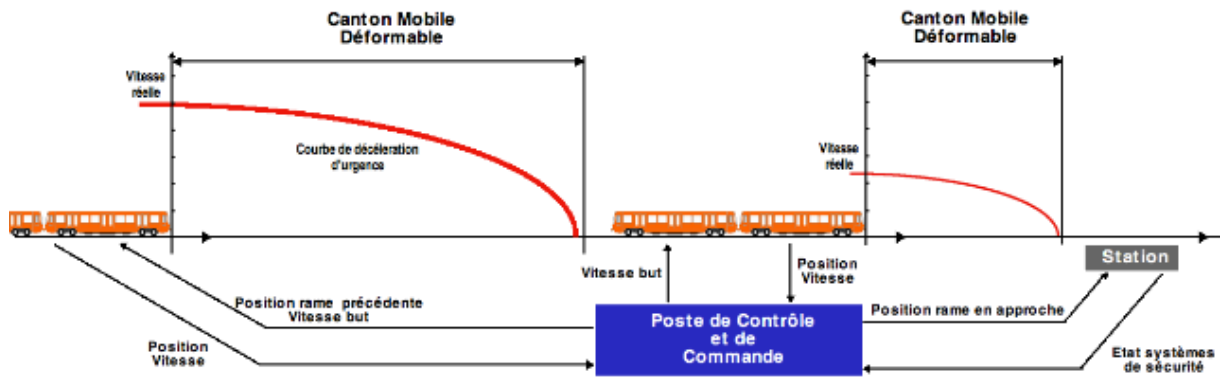


Figure 5 : Présentation du fonctionnement des cantons mobiles déformables du système automatique de MAGGALY.

Source : FerroLyon

Les métros et les systèmes similaires (VAL, *Personal Rapid Transit* guidés, ...) doivent obligatoirement posséder deux équipements informatiques de pilotage automatique pour être considérés comme des modes de transport automatiques. Il doit y avoir des équipements informatiques au sol et des équipements embarqués dans les rames.

Les équipements au sol ont une vision globale du fonctionnement de la ligne. Ils assurent la régulation et suivent précisément le déplacement de chacune des rames et les signalements d'anomalies. Les équipements au sol sont répartis entre le Poste de Commande Centralisé (PCC) et les équipements sur les voies et en station.

Au niveau des équipements embarqués, les rames doivent posséder un système informatique qui gère la marche du train en fonction des informations transmises par le sol, s'assure du bon fonctionnement de l'ensemble des éléments du train et déclenche les ouvertures et fermetures des portes. Il communique, également, la position et la vitesse instantanée de la rame, ainsi que toutes les anomalies éventuelles, et, en retour, reçoit des équipements informatiques au sol les informations nécessaires à sa marche.

1.2 Les transports autonomes non guidés

Depuis les années 1980, le développement des capacités de calcul des outils informatiques et la miniaturisation de l'électronique ont permis d'envisager l'émergence de véhicules autonomes. La reconnaissance d'images, les capteurs intelligents et les algorithmes de traitement du signal permettent aux véhicules autonomes d'adapter leur comportement au contexte. Ces avancées ont été permises par les recherches de nombreux laboratoires et entreprises à travers le monde.

En France, les véhicules autonomes ont fait l'objet de recherches au sein de l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA) depuis le début des années 1990. Cet institut national a notamment mis en place le Programme National de Recherche et D'Innovation dans les Transports terrestres (PREDIT) sous le patronage de plusieurs ministères et avec le soutien de l'Union Européenne dans le cadre du projet CityMobil.

A partir de ces recherches, l'INRIA a proposé à la Commission Européenne deux programmes qui portent sur les véhicules autonomes. Le premier se nomme CyberCars et concerne le volet technologique. Le second se nomme CyberMove et porte sur le volet socio-économique. Le travail réalisé dans le cadre de ces programmes a permis de développer, dès 1996, un prototype de véhicule autonome du nom de Cycab. Le Cycab est un petit véhicule autonome de trois ou quatre places qui circule à faible vitesse et qui a les capacités de communiquer avec les autres véhicules Cycab situés à proximité. Ce système est conçu pour circuler sur les zones où la circulation automobile est fortement restreinte et il a notamment circulé dans des parcs d'attraction ou des parkings d'aéroport. Ces véhicules sont équipés d'un ordinateur de bord, d'un laser, d'un système de suivi de véhicule (GPS et routeur mobile) et d'une caméra linéaire avec des cibles infrarouges pour faire des trains de véhicules.



Figure 6 : Un Cycab de l'INRIA et ses différents équipements. Source : INRIA

Plusieurs versions de Cycab se sont succédées au fil des années. La première version est la Cycab INRIA qui a été développée en 1996. Par la suite, de nouvelles versions ont été mises en place en collaboration avec des constructeurs, dont Yamaha. La collaboration entre l'INRIA et Yamaha a donné naissance à la CyberCab Yamaha, en 2000. Un modèle de bus a également été développé sous le nom de Cybus INRIA en 2011.



Figure 7 : Les différents modèles de véhicules autonomes développés par l'INRIA. Source : INRIA

Les Cycab ont été testés de 1997 à 1999 dans la commune de Saint-Quentin-en-Yvelines qui se situe à l'ouest de Versailles et dans le département des Yvelines. Au cours de cette expérimentation, une flotte de véhicules autonomes en libre-service a été mise en place. Un employé de la ville de Saint-Quentin-en-Yvelines conduisait une file de voitures autonomes à travers la ville et les différents véhicules du convoi se détachaient une fois arrivés à destination. Ce projet était piloté par l'exploitant de transport en commun, à l'époque CGFTE, et réunissait trois industriels, Dassault, Renault et EDF, ainsi que deux instituts nationaux de recherche, l'INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) et l'INRETS (Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité). Dans le cadre de l'expérimentation, le groupement réunissant des entreprises et des instituts de recherche avait pris le nom de Praxitèle. Cette expérimentation disposait de financements dans le cadre du 4^{ème} programme-cadre de recherche et développement de l'Union Européenne, sur la période allant de 1994 à 1998. Les Cycab ont également été expérimentés dans la ville d'Antibes, sur le port de plaisance, du 3 au 13 juin 2004.

L'INRIA a ensuite mis en place un test des Cybus à La Rochelle, en 2011. Dans le cadre de cette expérimentation, les trois véhicules Cybus mis en service pouvaient accueillir chacun cinq personnes, dont l'opérateur chargé de suivre le bon déroulement de l'exploitation. Les Cybus desservait une

liaison entre une ligne de bus en site propre et une navette maritime. L'expérimentation avait lieu sur une voie semi-piétonne.



Figure 8 : Un Cybus en test à La Rochelle en 2011. Source : Golem13

Entre novembre 2014 et avril 2015, La Rochelle accueille une nouvelle expérimentation de véhicules de transport en commun autonomes. Six minibus autonomes conçus par le constructeur français Robosoft⁶ sont mis en service. Pour ce deuxième test, les véhicules parcouraient une distance de 1.7 kilomètre, de la gare SNCF de la ville au forum technologique situé au cœur de l'université.

A la même époque, l'entreprise italienne Zagato, une société spécialisée dans la conception et la réalisation de carrosseries automobiles, a mis en place un concept de taxis-bus autonomes avec une mémoire de destination. Ce véhicule a été présenté lors du Sommet de l'Énergie du Monde du Futur qui se déroulait au mois d'octobre 2009 à Abu Dhabi. Plus tard, Zagato s'est associée à l'entreprise hollandaise 2GetThere, une société spécialisée dans les automatismes, pour promouvoir un PRT.

Au niveau européen, l'Union Européenne (UE) a lancé CityMobil 2, en 2012, dans le cadre du 7^{ème} programme-cadre de recherche et de développement (FP7). CityMobil 2 est un programme d'expérimentation de véhicules autonomes qui a pour objectif de préparer l'arrivée de transports publics sans conducteur en Europe. Lors de la première phase de test, douze villes ont réalisé des études pour déterminer s'il était possible de mettre en place un système de transport automatisé sur leur territoire et pour définir des zones pertinentes en vue du lancement d'expérimentations. Ce projet visait également à définir les besoins techniques des douze expérimentations pour obtenir une interopérabilité entre les différents systèmes. Dans une autre phase, le projet CityMobil 2 a fourni et

⁶ Robosoft est une entreprise française pionnière dans la robotique qui a été créée par des ingénieurs de l'INRIA en 1985.

testé plusieurs groupes de véhicules automatisés et les a mis à disposition de sept villes qui ont été sélectionnées pour accueillir une démonstration durant six à huit mois.

CityMobil 2 a pour spécificité de faire le lien entre les questions de recherche sur les véhicules autonomes, soit sur les aspects techniques et financiers, les besoins de mobilité et les politiques d'aménagement du territoire, soit sur les questions juridiques. Le programme s'est terminé en 2016.

II- Les automatismes dans les transports en commun d'aujourd'hui

Les véhicules autonomes de transport public deviennent aujourd'hui une réalité. De nombreux tests ont été réalisés sur des circuits fermés et des navettes autonomes sont aujourd'hui en expérimentation sur la voie publique. Le développement des transports en commun autonomes nécessite de définir les termes *mobilité autonome* et *navette autonome*, de faire le point sur les technologies utilisées pour rendre les véhicules de transport en commun autonomes et de présenter les constructeurs présents sur le marché et les modèles disponibles.

2.1 Définition de la mobilité autonome

Les systèmes de transport intelligents sont nés de la combinaison des avancées technologiques au niveau des capacités de calcul et de traitement de l'information et au niveau de la disponibilité et de la fiabilité des outils de communication, de positionnement des véhicules et de détection des obstacles.

On parle de véhicule autonome lorsque celui-ci est équipé d'un système de pilotage automatique qui lui permet de circuler sans intervention humaine dans des conditions de circulation réelles.

Deux grands axes permettent de cerner le niveau d'automatisation du véhicule.

Il y a d'un côté la capacité du véhicule à réaliser des mouvements sans intervention extérieure. Ces mouvements comprennent les mouvements longitudinaux, les accélérations, les freinages, ainsi que les mouvements latéraux avec les changements de voie et de direction.

Le second axe porte sur le degré d'implication ou de décision du conducteur avec soit une surveillance active, soit une veille passive, soit une absence de conducteur. Un véhicule autonome saura réaliser les mouvements longitudinaux et latéraux sans intervention extérieure et le conducteur sera absent ou en veille passive.

Les différents niveaux d'automatisation ont été définis par le volet *Véhicule Autonome* du plan de *La Nouvelle France Industrielle*.

Niveau d'automatisation	Caractérisation des niveaux d'automatisation		
	Éléments contrôlés	Activité de surveillance	Situations limites
Niv 0 : Pas d'automatisation	Le système ne prend en charge ni le contrôle longitudinal, ni le contrôle latéral. Ceux-ci sont effectués par le conducteur	Pas de tâche contrôlée	Pas applicable.
Niv 1 : Assisté	Le système prend en charge le contrôle longitudinal ou le contrôle latéral.	Le conducteur doit surveiller le système en permanence.	Le système n'est pas capable de détecter les limites de l'ensemble de ses capacités. Ceci est de la responsabilité du conducteur.
Niv 2 : Automatisation partielle	Le système prend en compte simultanément le contrôle longitudinal et latéral.	Le conducteur doit surveiller le système en permanence. Les activités non liées à la conduite ne sont pas permises.	Lorsque le système identifie ses limites, le conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule.
Niv 3 : Automatisation conditionnelle	Le système prend en compte simultanément le contrôle longitudinal et latéral.	Le conducteur n'a pas à surveiller le système en permanence. Les activités non liées à la conduite sont permises de manière limitée.	Le système identifie la limite de ses performances, cependant il n'est pas capable de ramener seul le système dans un état de risque minimum pour toutes les situations. En conséquence, le conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule dans un laps de temps déterminé. Les situations d'urgence peuvent être prises en compte par le système, à condition qu'il puisse être relayé par un conducteur humain
Niv 4 : Automatisation haute	Le système prend en compte simultanément le contrôle longitudinal et latéral.	Le conducteur n'a pas à surveiller le système en permanence. Les activités non liées à la conduite sont permises en permanence durant le cas d'usage.	Le système identifie la limite de ses performances et peut automatiquement faire face à toute situation survenant lors du cas d'usage. A l'issue du cas d'urgence, le conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule
Niv 5 : Automatisation complète	Le système prend en compte simultanément le contrôle longitudinal et latéral.	Le conducteur n'est pas requis.	Le système identifie la limite de ses performances et peut automatiquement faire face à toute situation survenant lors du trajet complet.

Figure 9 : Les différents niveaux d'automatisation définis par la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) dans le cadre du volet *Véhicule autonome* du plan de *La Nouvelle France Industrielle*. Source : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). Date : Septembre 2015

Il existe quatre niveaux d'automatisation selon la caractérisation du volet *Véhicule Autonome* du plan de *La Nouvelle France Industrielle*. Les deux premiers niveaux de la classification font référence à des situations d'absence d'automatisation, où le système ne prend pas en charge le contrôle longitudinal et le contrôle latéral et où les mouvements sont assurés par le conducteur du véhicule (le niveau n°0), et à des situations d'assistance à la conduite où le système prend en charge soit le contrôle longitudinal, soit le contrôle latéral (le niveau n°1). Le système n'est pas capable de détecter les limites de l'ensemble de ses capacités. Le conducteur est responsable de la conduite et doit surveiller le système en permanence.

Le premier niveau d'automatisation, ou automatisation partielle (le niveau n°2), est le moins évolué de tous les niveaux d'automatisation. Le système prend en compte simultanément le contrôle longitudinal et le contrôle latéral. Le système identifie ses limites et le conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule. Pour cela, le conducteur doit surveiller en permanence le système.

Dans le deuxième niveau d'automatisation, ou automatisation conditionnelle (le niveau n°3), le système prend également en compte simultanément le contrôle longitudinal et le contrôle latéral, il identifie la limite de ses performances et n'est capable de ramener le système dans un état de risque minimum que dans certaines situations. Le conducteur est dans l'obligation de surveiller le système en permanence et les activités non liées à la conduite sont permises de manière limitée.

Le troisième niveau d'automatisation, ou automatisation haute (le niveau n°4), est un niveau d'automatisation élevé où le système prend en charge le contrôle longitudinal et le contrôle latéral et où il identifie ses limites et sait faire face à toutes les situations survenant lors du cas d'usage. Le conducteur n'est pas dans l'obligation de surveiller en permanence le système et les activités non liées à la conduite sont permises, du moins durant le cas d'usage. Cependant, le conducteur doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule en cas d'urgence.

L'automatisation complète correspond au niveau n°5. Dans ce niveau d'automatisation, les contrôles longitudinaux et latéraux sont pris en compte par le système qui identifie la limite de ses performances et peut automatiquement faire face à toute situation survenant lors du trajet complet. La présence du conducteur n'est pas requise. Les véhicules autonomes développés par l'INRIA et les navettes autonomes dont il est question dans ce mémoire disposent d'une automatisation de niveau 5.

2.2 Définition d'une navette autonome

Les navettes autonomes sont de petits véhicules rectangulaires de transport en commun qui sont totalement automatisés et peuvent circuler sans conducteur, ni opérateur (en fonction de l'état d'actualisation de la législation). Les dimensions de ces véhicules sont réduites, ils font environ quatre mètres de long, deux mètres de large et deux mètres et demi de haut. Ils peuvent embarquer jusqu'à quinze personnes. Leur petite taille et leur faible capacité en font des véhicules hybrides pouvant être utilisés sur des services de transport en commun et sur des services de mobilité plus personnalisés.



Figure 10 : Navette autonome Arma du constructeur Navya en circulation sur le quai Rambaud dans le quartier de La Confluence à Lyon. Source : Bruno Amsellem. Agence Divergence pour le journal *L'Obs*.

Ces véhicules peuvent fonctionner sous cinq modalités d'exploitation différentes :

- Un mode d'exploitation fixe, similaire aux lignes de métro, avec un itinéraire précis et des stations fixes où la navette autonome s'arrête systématiquement
- Un mode d'exploitation proche de celui des lignes de bus conventionnelles avec un itinéraire fixe et des arrêts fixes à la demande où la navette autonome ne s'arrêtera que si une personne souhaite monter dans le véhicule ou en descendre.
- Un mode d'exploitation avec des arrêts fixes, où la navette autonome ne s'arrête que si des voyageurs souhaitent monter ou descendre, et un itinéraire souple, en fonction des besoins de mobilité des personnes. Cependant, les itinéraires demandés par les usagers doivent obligatoirement relier les arrêts fixes présents sur la zone de desserte. Il n'y a pas d'ordre de desserte des arrêts comme sur une ligne conventionnelle. La navette se rend à l'arrêt le plus proche de la destination de la personne qu'elle transporte.
- Un mode d'exploitation avec un itinéraire fixe, que la navette autonome doit suivre, et des arrêts souples, en fonction des demandes des usagers. La navette autonome suit un itinéraire précis, sans arrêts officiels et matérialisés. Elle s'arrête à n'importe quel endroit de son itinéraire, en fonction des lieux où souhaitent descendre ou monter les usagers. Les usagers qui souhaitent monter dans la navette autonome attendent sur le tracé du véhicule et signalent leur présence à la navette autonome (par une application mobile ou directement en hélant le véhicule).

- Enfin, la navette autonome peut fonctionner comme un service à la demande sur un périmètre de desserte, sans itinéraires ou arrêts fixes. Dans ce mode de fonctionnement, la navette autonome récupère les passagers sur un lieu convenu, via l'application mobile ou le site internet de l'opérateur de transport en commun, et les dépose sur le lieu de destination (programmé au moment de la réservation sur le site internet ou l'application mobile, ou directement dans la navette, via un écran de contrôle).

Les navettes autonomes sont considérées comme un élément des futurs services de mobilité, de préférence dépossédés et partagés, qui auront pour objectifs d'augmenter l'usage des transports en commun et de réduire la part modale et l'utilisation de la voiture individuelle.

2.3 Les principales technologies embarquées dans les navettes autonomes de transport en commun et leur fonctionnement

Un véhicule autonome s'articule autour de trois grandes fonctions, la perception, la planification et le contrôle.



Figure 11 : Schéma qui présente les trois grandes fonctions des véhicules autonomes avec les capteurs (la perception), l'intelligence artificielle (la planification) et les actionneurs (le contrôle). Source : Oliver Wyman, Daimler

La maîtrise en temps réel de ces différentes fonctions nécessite l'équipement du véhicule autonome par des lidars, des caméras de stéréovision, des capteurs d'odométrie et des GPS. Le véhicule doit également posséder une intelligence artificielle, basée sur des algorithmes, capable d'analyser les données récoltées par les capteurs et de prendre des décisions.

Les véhicules sont équipés de LIDAR, pour Light Detection And Ranging, qui sont des systèmes de télédétection par laser qui mesurent les objets à distance en analysant les propriétés d'un faisceau lumineux qui est renvoyé vers son émetteur. Ces capteurs sont positionnés aux quatre coins du

véhicule et ils permettent à celui-ci de se repérer dans l'espace et d'identifier les différents obstacles à proximité.

Les LIDAR sont complétés par des caméras de stéréovision. Celles-ci sont placées à l'avant et à l'arrière du véhicule. Elles permettent au véhicule d'effectuer des mesures stéréoscopiques et de déterminer les dimensions, la forme et la position des différents objets qui se trouvent à proximité. Ces caméras offrent la possibilité au véhicule de visualiser les feux de circulation et les panneaux de signalisation.

Les calculs de position du véhicule sont complétés par des capteurs d'odométrie qui informent le système sur la position du véhicule et les distances parcourues. Un GPS est utilisé en complément pour localiser le véhicule sur son parcours.

Les capteurs amènent l'information et l'intelligence du véhicule permet d'interpréter les différentes informations communiquées par ces capteurs. L'intelligence artificielle comprend des algorithmes⁷ qui analysent les informations fournies par les capteurs (LIDAR, caméras de stéréovision, capteurs d'odométrie et GPS) et prennent des décisions concernant les objets en mouvement, les objets statiques et les panneaux de signalisation ou les feux tricolores.

Les itinéraires des navettes autonomes sont pré-cartographiés avec une précision au centimètre et sont enregistrés dans la mémoire de la navette. Les navettes suivent l'itinéraire pré-cartographié et ont besoin de la cartographie pour avoir un pied dans la réalité et pour se repérer.

Un opérateur présent à distance dans un centre de supervision est chargé de surveiller le bon déroulement de l'exploitation et le bon fonctionnement du véhicule. Ce suivi est réalisé via une plateforme informatisée. Si le véhicule est face à une situation à laquelle il ne peut pas répondre seul, l'opérateur peut l'autoriser à outrepasser certaines règles. Les communications avec les centres de supervision fonctionnent à partir des liaisons mobiles UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), aussi appelées liaisons 3G, et LTE (Long Term Evolution), aussi appelées liaisons 4G. Dans certains cas, la liaison peut être effectuée par le réseau Wireless Fidelity, ou réseau WI-FI. Un seul opérateur peut superviser jusqu'à plusieurs dizaines de véhicules autonomes car la plupart des actions des véhicules sont automatisées et ne nécessitent pas une surveillance constante.

⁷ Selon l'encyclopédie en ligne *Wikipédia*, les algorithmes sont des suites finies et non ambiguës d'opérations ou d'instructions qui permettent de résoudre un problème ou d'obtenir un résultat.

Il est également possible de mettre en place des solutions alternatives à l'équipement des véhicules par des capteurs LIDAR. Ces solutions se basent sur la communication entre les véhicules et les infrastructures et sont appelées les Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs (C-ITS). Elles permettent une bonne précision dans la perception du véhicule, de son positionnement et de la localisation des objets en mouvement ou statiques. Les solutions C-ITS permettent aux véhicules de communiquer entre eux, on parlera de solutions V2V, et/ou avec les infrastructures, on parlera alors de solutions V2X. Cette solution permet de diminuer le coût des véhicules autonomes, qui ne sont plus forcément dotés de capteurs LIDAR onéreux, mais elle oblige à équiper les infrastructures et les véhicules avec des stations ITS. Les stations ITS présentes au niveau de l'infrastructure se nomment des Unités de Bord de Route (UBR) et les stations ITS au niveau des véhicules se nomment des Unités Embarquées de Véhicules (UEV). Le point faible de cette solution est le coût d'équipement des infrastructures qui peut être élevé pour les collectivités. De plus, la complexité du système et le nombre important de capteurs rendent la probabilité d'une panne ou d'un incident technique plus élevée.

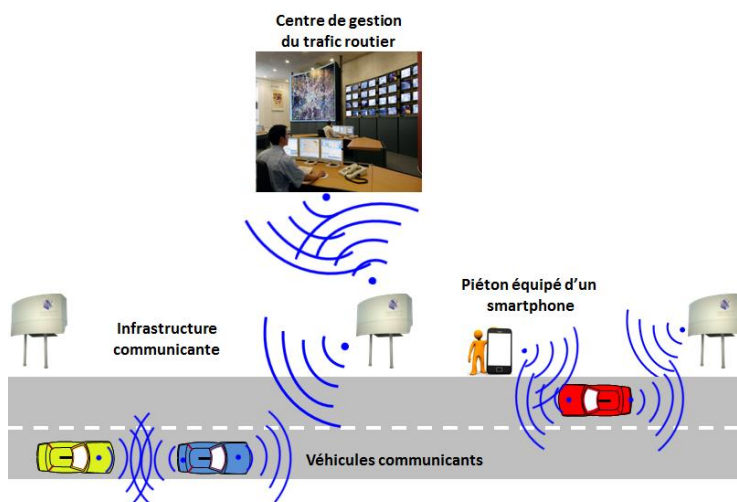


Figure 12 : Fonctionnement des Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs (C-ITS). Source : INRIA

Les progrès réalisés au niveau des capacités de calcul et de traitement de l'information des systèmes de pilotage automatisés, ainsi qu'au niveau de l'amélioration des outils de communication, de positionnement des véhicules et de détection des obstacles, ont permis de développer et de faire circuler des véhicules autonomes. Cependant, Arnaud de la Fortelle, le directeur du centre de robotique Mines ParisTech, précise, dans le numéro 1171 de la revue *Transport Public*, « que le véhicule autonome est un véhicule robot. Il se heurte donc à tous les problèmes rencontrés

actuellement par la robotique et qui tournent autour du triangle perception – planification – contrôle »⁸.

2.4 Le marché des navettes autonomes, modèles et constructeurs

Le marché des véhicules de transport en commun autonomes est un marché récent qui est moins concurrentiel que celui des voitures autonomes où le nombre d'acteurs est plus important. Il existe trois grands constructeurs sur le marché des navettes autonomes, deux constructeurs français, EasyMile et Navya, et un constructeur américain, Local Motors. Chacun d'eux propose un modèle de navette autonome d'une quinzaine de places, l'EZ10 pour EasyMile, Arma pour Navya et Olli pour Local Motors.

L'entreprise EasyMile est spécialisée dans le développement et la fabrication de véhicules autonomes sans conducteur et indépendants des infrastructures, dans la conception des logiciels de gestion des véhicules autonomes et dans la mise en place de solutions de mobilité intelligente. Cette start-up est basée à Toulouse et possède des bureaux à Singapour, dans la République de Singapour, et à Denver, aux Etats-Unis. Elle est née du rapprochement de la société Ligier, un constructeur automobile français spécialisé dans les voitures sans permis et qui a participé aux championnats du monde de Formule 1 entre 1976 et 1996, avec la société Robosoft, une entreprise pionnière dans la robotique qui a été créée par des ingénieurs de l'INRIA en 1985. Robosoft est l'entreprise qui a, notamment, développé le véhicule autonome expérimenté à La Rochelle dans le cadre du projet européen CityMobil2. EasyMile regroupe le savoir-faire en construction automobile de Ligier et en robotique de services de Robosoft.

EasyMile a développé l'EZ10, une navette autonome qui se positionne comme une solution complémentaire par rapport aux services existants de transport en commun, et plus généralement de mobilité. Elle vise la desserte du premier ou du dernier kilomètre, ainsi que la desserte de sites fermés tels que des aéroports, des campus, des hôpitaux et des zones d'activités.

L'EZ10 possède trois modes de fonctionnement selon le constructeur. Elle peut être exploitée sur une ligne prédéfinie, en mode métro. La navette s'arrête alors à tous les arrêts, sans exception. Elle peut fonctionner en mode bus et ne s'arrêter aux arrêts que si une personne demande l'arrêt ou souhaite monter dans le véhicule. Enfin, elle peut fonctionner avec un mode d'exploitation plus souple, comme un transport à la demande, avec des itinéraires et des arrêts flexibles qui s'adaptent

⁸ GUILLEMIN, C. (2016). Ville ouverte pour les navettes autonomes. *Transport Public* (n°1171)

aux besoins des usagers. Dans ce dernier cas, le véhicule peut être réservé via une application mobile.

Au niveau technique, la navette d'EasyMile possède des moteurs asynchrones électriques qui lui permettent de circuler à une vitesse de croisière qui s'élève à 20 km/h. La vitesse maximale s'élève, quant à elle, à 40 km/h. L'EZ10 dispose de batteries au Lithium-Ion (LifeP04) qui lui permettent d'assurer jusqu'à quatorze heures d'exploitation selon les données transmises par le constructeur. Cette navette peut transporter jusqu'à douze personnes, avec six places assises et six places debout, et peut accueillir des personnes à mobilité réduite. Sa charge utile est de 1 700 kg et sa charge maximale est de 2 750 kg. Enfin, au niveau des dimensions, la navette est longue de 3,928 mètres, large de 1,986 mètres et haute de 2,750 mètres.



Figure 13 : Deux navettes EZ10 d'EasyMile se croisent sur le pont Charles De Gaulle à Paris. Source : RATP

La société Nava est une entreprise française spécialisée dans le développement de solutions de mobilité intelligente qui développe des véhicules électriques robotisés, sans conducteur et indépendants des infrastructures. Cette start-up est basée à Paris, pour le département Recherche et Développement, et en région lyonnaise, pour les activités de production, la réalisation et la validation des tests et l'administration. Nava a été créée suite au rachat par Christophe Sapet, co-fondateur des sociétés Infogrames⁹ et Infonie¹⁰, et le fond d'investissement Robolution Capital¹¹ de la société

⁹ Une ancienne société française d'édition et de distribution de jeux vidéo basée à Lyon.

¹⁰ Un fournisseur d'accès à internet qui a existé de 1995 à 2001.

¹¹ Un fond de placements privé consacré à la robotique de service présidé par Bruno Bonnell.

Induct, alors en liquidation. Induct était une société française spécialisée dans les solutions de mobilité urbaine qui avait développé une navette autonome en 2009 sous le nom de Navia.

La société Navya a développé la navette autonome Arma. Cette navette s'inspire du véhicule créé par la société Induct et l'a fait évoluer vers les standards du transport de voyageurs. Elle est destinée à circuler sur des dessertes du premier ou du dernier kilomètre, ainsi que sur des sites fermés tels que des aéroports, des campus, des hôpitaux et des zones d'activités.

Comme pour la navette d'EasyMile, la Navya Arma possède trois modes de fonctionnement selon son constructeur. Elle peut être exploitée sur une ligne prédéfinie, en mode métro. La navette s'arrête alors à tous les arrêts, sans exception. Elle peut fonctionner en mode bus et ne s'arrête aux arrêts que si une personne demande l'arrêt ou souhaite monter dans le véhicule. Enfin, elle peut fonctionner avec un mode d'exploitation plus souple, comme un transport à la demande, avec des itinéraires et des arrêts flexibles qui s'adaptent aux besoins des usagers. Dans ce dernier cas, le véhicule peut être réservé via une application mobile.

Au niveau technique, la navette de Navya possède des moteurs électriques qui lui permettent de circuler à une vitesse de croisière qui s'élève à 25 km/h. La vitesse maximale s'élève, quant à elle, à 45 km/h. Ses batteries au Lithium-Ion (LifePO4) lui permettent d'assurer jusqu'à 9 heures d'exploitation selon les données du constructeur. Cette navette peut transporter jusqu'à 15 passagers, avec 11 passagers assis et 4 passagers debout, et peut accueillir des personnes à mobilité réduite. Son poids à vide est de 2 400 kg et son poids total autorisé en charge est de 3 450 kg. La navette est longue de 4,75 mètres, large de 2,11 mètres et haute de 2,65 mètres.



Figure 14 : Une navette autonome Navya Arma en expérimentation à Sion, en Suisse. Source : navya.tech

Au-delà de l'Europe, un constructeur américain du nom de Local Motors a développé une navette autonome sur les marchés nord-américain et européen. Local Motors est une entreprise spécialisée dans la fabrication de voitures. La société fabrique des voitures en faible volume et les plans des modèles des véhicules sont fournis par les utilisateurs d'une communauté en ligne qui communiquent et échangent, sur le site internet de Local Motors, au sujet de la conception, de l'ingénierie et de la construction de véhicules innovants. La société développe ses véhicules dans de petites usines et les construit en utilisant la technique de l'impression 3D.

Local Motors a lancé une navette autonome qui se nomme Olli. Cette navette autonome est destinée à circuler sur des dessertes du premier ou du dernier kilomètre, ainsi que sur des sites fermés tels que des aéroports, des campus, des hôpitaux et des zones d'activités.

Au niveau technique, la navette autonome de Local Motors possède un moteur EMRAX 228 High Voltage LC qui lui permet d'atteindre une vitesse maximale de 40 km/h. Elle peut transporter une dizaine de personnes et peut accueillir des personnes à mobilité réduite. La navette est longue de 3,92 mètres, large de 2,05 mètres et haute de 2,50 mètres. Cette navette a la particularité de pouvoir dialoguer avec ses utilisateurs. Cette application est possible grâce à l'IBM Watson IoT qui analyse les informations en temps réel pour fournir des informations sur le lieu de destination (restaurants, monuments, services, ...).



Figure 15 : Une navette Olli de Local Motors. Source : aruco.com

III- Navettes et bus autonomes, plusieurs usages envisageables

Les navettes autonomes représentent un mode de transport pouvant être exploité de différentes manières. Elles peuvent fonctionner avec des modes d'exploitation rigides, à l'image des lignes de transport en commun conventionnelles qui circulent sur une ligne avec des arrêts définis, ou avec des modes d'exploitation souples, sans arrêts et/ou itinéraires fixes. Ces différents modes d'exploitation répondent à des besoins de déplacement différents et s'adaptent chacun à des territoires spécifiques.

Les navettes autonomes peuvent être utilisées, en partie ou en totalité, sur des déplacements de longue distance entre plusieurs secteurs d'une même aire urbaine. Elles effectueront alors la desserte du premier ou du dernier kilomètre d'une zone peu dense, en rabattement sur des lignes de transport en commun structurantes (ce qui nécessite une rupture de charge pour passer d'un mode à un autre), ou l'intégralité du déplacement de l'usager, en assurant le déplacement de la personne de son point de départ à son point d'arrivée (ce qui supprime les ruptures de charge mais nécessite des véhicules autonomes plus rapides). Ce dernier mode d'exploitation impose l'utilisation d'un ensemble de navettes autonomes qui vont desservir individuellement les portions des premiers et derniers kilomètres et circuler en peloton sur les parties centrales du déplacement, là où les différents flux convergent et là où la fréquentation est la plus importante.

Les services de navettes autonomes peuvent être utilisés sur des déplacements de courte distance, inférieurs à cinq kilomètres et limités à un même secteur d'une aire urbaine. Les navettes autonomes assureront la desserte de proximité dans les secteurs contraints, tels que les centres villes, où les transports en commun peuvent difficilement circuler du fait de l'étroitesse des rues et de la piétonnisation de ces secteurs, ou dans les secteurs à faible densité où les transports publics, qui demandent un certain niveau de demande pour être attractifs, ne sont pas performants. Elles sont aussi adaptées pour assurer des services de transport à la demande sur une zone précise et délimitée et pour répondre à des besoins de transport plus personnalisés. Enfin, les navettes autonomes peuvent assurer la desserte des sites fermés privés et publics, tels que les aéroports, les campus, les centres commerciaux, les hôpitaux, les pôles de loisirs et les zones d'activités. Elles offriraient une solution de transport pour la desserte de l'extérieur (porte d'entrée du site, là où se situent les transports en commun et les parkings) à l'intérieur du site, et l'inverse, ainsi que pour la desserte interne du site, pour desservir les différents lieux d'intérêts.

Enfin, la conduite autonome peut également servir dans le cadre des circulations techniques. Les automatismes permettraient, par-exemple, aux véhicules de transport public d'effectuer des trajets en haut-le-pied¹² ou d'assurer les mouvements nécessaires au remisage des véhicules dans les dépôts.

3.1 Utilisation des navettes autonomes pour des déplacements sur de longues distances dans une aire urbaine

Les navettes autonomes peuvent permettre de réaliser des déplacements sur de longues distances dans une même aire urbaine. Elles permettront, en assurant une partie ou la totalité du trajet de l'utilisateur, des déplacements de plusieurs kilomètres et entre plusieurs secteurs d'une même aire urbaine. Pour assurer ces déplacements, les navettes autonomes peuvent fonctionner sur le premier ou dernier kilomètre des zones peu denses, en rabattement sur les lignes de transport en commun structurantes, ou fonctionner sur toute la distance du trajet, en assurant le déplacement de l'utilisateur de son point de départ à son point d'arrivée.

3.1.1. Une solution pour couvrir les segments du premier ou du dernier kilomètre en milieu peu dense et en lien avec une ligne de transport en commun structurante

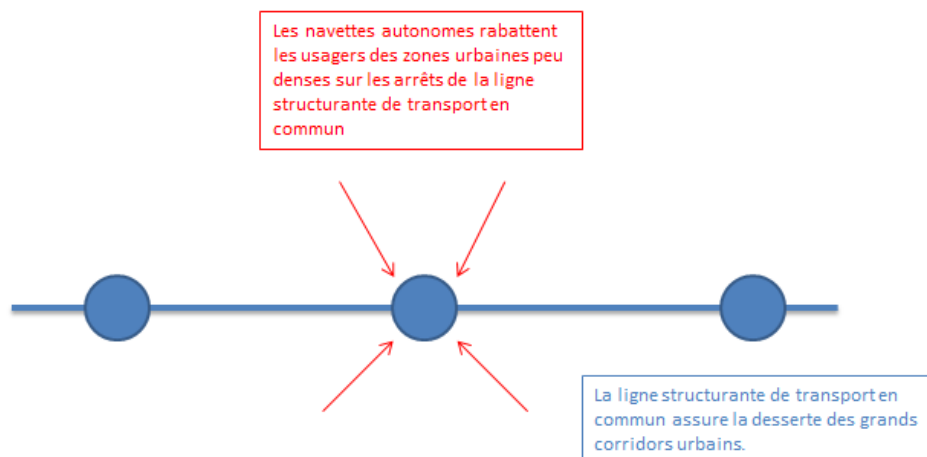


Figure 16 : Services de navette autonome qui assurent la desserte d'une zone urbaine peu dense et rabattent sur une ligne structurante de transport en commun. Réalisation : Rodolphe Murat

¹² L'expression *haut-le-pied* est utilisée dans le secteur professionnel des transports collectifs pour désigner un déplacement effectué en-dehors du service commercial et sans voyageurs.

3.1.1.1 Description de ce type d'usage

Les navettes autonomes pourraient représenter une solution pour les déplacements du premier et du dernier kilomètre dans les secteurs moins denses. Les véhicules autonomes de transport public développés aujourd'hui par les constructeurs (EasyMile, Local Motors et Navya) sont des véhicules de petite taille pouvant accueillir jusqu'à une quinzaine de personnes. Ils seraient adaptés à la desserte des zones des premiers et derniers kilomètres où les besoins de déplacement sont éparpillés sur le territoire, à l'inverse des corridors des lignes de transport en commun structurantes où les flux sont concentrés sur un axe.

Les navettes autonomes permettraient aux usagers des transports en commun de pouvoir se rendre, depuis leur lieu de destination, à un arrêt d'une ligne de transport en commun structurante, et, à l'inverse, de rejoindre leur lieu de destination depuis le service de transport en commun structurant. Les véhicules autonomes partiraient d'un pôle d'échanges situé au niveau du terminus ou d'un arrêt de la ligne de transport en commun structurante et desserviraient une zone urbaine limitée et précise. Une fois que les véhicules autonomes sont arrivés à destination, ils repartent avec des voyageurs, ou en haut-le-pied en cas d'absence de voyageurs, jusqu'au pôle de correspondances avec la ligne structurante. Les départs et les arrivées des navettes autonomes peuvent être cadencés avec les heures d'arrivée et de départ des véhicules circulant sur la ligne de transport en commun structurante. De plus, le service est accessible à tout moment, dans les limites des heures d'ouverture du réseau. Il suffit alors de monter dans le véhicule lorsqu'il est stationné au pôle d'échanges ou de le réserver sur l'application mobile ou le site internet de l'exploitant du service.

Les itinéraires empruntés par la navette autonome peuvent être fixes, la navette suit un itinéraire programmé, ou flexibles, la navette n'a pas d'itinéraires programmés et les trajets sont déterminés en fonction des besoins des usagers. Du côté des arrêts, ceux-ci peuvent être fixes, les arrêts sont localisés et signalés, ou flexibles, les arrêts se font en fonction des besoins des usagers et de leurs lieux de départ et de destination. Les services assurés avec des arrêts fixes disposent de deux politiques d'arrêt avec des arrêts systématiques, la navette autonome dessert tous les arrêts, ou des arrêts à la demande, la navette autonome ne dessert que les arrêts où il y a des usagers qui souhaitent monter ou descendre.

3.1.1.2 Avantages de ce type d'usage

Dans ce scénario, les services assurés par les navettes autonomes favoriseraient l'intermodalité et le passage d'un mode de transport à un autre au cours d'un même déplacement. Les transports lourds, tels que les lignes de métro, tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS)¹³ assureraient l'acheminement d'un maximum de personnes sur les axes où la demande est la plus élevée et les navettes autonomes assureraient la desserte du tronçon final où la demande est moins forte. Les différents modes de transport en commun sont complémentaires.

La navette autonome pourrait représenter une solution efficace pour diminuer la place de la voiture individuelle dans les zones urbaines peu denses. Elles permettraient aux usagers de disposer d'une desserte de transport en commun aux amplitudes de fonctionnement plus larges, par rapport aux services de navette actuels qui s'arrêtent de fonctionner en fin de journée, et avec des horaires cadencés sur ceux des lignes structurantes. Elles assureraient le complément de desserte permettant aux usagers d'effectuer l'intégralité du trajet en transport en commun, en se rapprochant d'un service de porte-à-porte¹⁴. Les différentes améliorations permises par l'intégration de navettes autonomes rendraient les transports en commun plus compétitifs face à la voiture individuelle.

Les services assurés par des navettes autonomes peuvent facilement être adaptés aux besoins. Il est possible d'ajouter ou d'enlever des navettes autonomes du service pour répondre aux besoins de mobilité. L'adaptabilité du service est une source d'économie car elle permet de calculer au plus juste les besoins en matériel roulant et d'éviter que des véhicules de transport en commun circulent à vide ou que le service soit saturé.

L'absence de conducteur dans les différents services assurés par des navettes autonomes permet de limiter les charges d'exploitation en réduisant les coûts liés à la masse salariale. Les anciens conducteurs peuvent être affectés à d'autres postes. Le personnel de conduite se verrait proposer des postes dans les centres de contrôle qui surveillent le fonctionnement du réseau, des postes d'agent d'accueil et de renseignement auprès des usagers du réseau ou encore des postes d'agent de surveillance du réseau et de contrôle des titres de transport. Le développement des automatismes

¹³ Un Bus à Haut Niveau de Service, ou BHNS, est une ligne de bus avec un niveau d'offre qui se rapproche des lignes de transport en commun en site propre (tramway, métro, ...). Les lignes de BHNS disposent de couloirs réservés sur la majeure partie de leur tracé, de la priorité aux feux, d'une offre renforcée (que ce soit pour les fréquences et l'amplitude de fonctionnement), de stations aménagées (avec un abri, un afficheur des temps d'attente et parfois un distributeur automatique de billets) et de véhicules au design amélioré.

¹⁴ Un trajet de porte-à-porte est un trajet du lieu de départ au lieu de destination.

pourrait permettre de réorienter le travail des agents vers les missions de services à destination des clients des réseaux tout en assurant une présence humaine dans les véhicules et les stations.

Enfin, le développement des navettes autonomes permettrait aux personnes qui ne peuvent acquérir un véhicule, qui n'ont pas la possibilité ou la capacité de conduire un véhicule ou qui ont des difficultés à se déplacer de pouvoir utiliser ce nouveau service de transport en commun. Ces personnes pourraient se déplacer facilement au sein de l'aire urbaine, grâce à la correspondance assurée avec la ligne structurante, à tout moment de la journée et pour un coût raisonnable. Les services assurés avec des navettes autonomes pourraient être une solution aux problématiques de déplacement des personnes ayant des difficultés financières, médicales ou sociales.

3.1.1.3 Inconvénients de ce type d'usage

La nécessité de prendre plusieurs modes de transport en commun au cours d'un même déplacement, avec l'utilisation au minimum d'une ligne de transport en commun structurante et d'une desserte en navette autonome, implique une ou plusieurs ruptures de charge qui peuvent être pénalisantes pour l'utilisateur. Les ruptures de charge peuvent augmenter la durée du trajet, notamment si les horaires ne sont pas bien cadencés ou si la navette n'est pas disponible au pôle d'échanges, être sources de stress pour l'utilisateur et rendre les déplacements des personnes à mobilité réduite plus difficiles, voire impossibles.

Cette solution de desserte pose également la question de la gestion des flux pour le dernier kilomètre des déplacements. Les flux de voyageurs seraient concentrés sur les périodes d'arrivée des véhicules de la ligne structurante de transport en commun, dans le cas d'un terminus, ou au moment du passage d'un véhicule, dans le cas d'un arrêt intermédiaire. Il serait donc nécessaire d'avoir un nombre suffisant de navettes autonomes pour prendre en charge les nombreux voyageurs, desservir tous les lieux de destination et s'assurer que des navettes autonomes seraient présentes au prochain passage d'un véhicule sur la ligne structurante.

Enfin, ces services viendraient concurrencer les taxis en récupérant une partie des courses aujourd'hui réalisées par cette profession. Les solutions de transport permises par les navettes autonomes posent donc la question de la pérennité des solutions de mobilité proposées par les taxis.

3.1.2 Une solution permettant d'assurer la totalité du déplacement de l'utilisateur et utilisée en remplacement des services existants

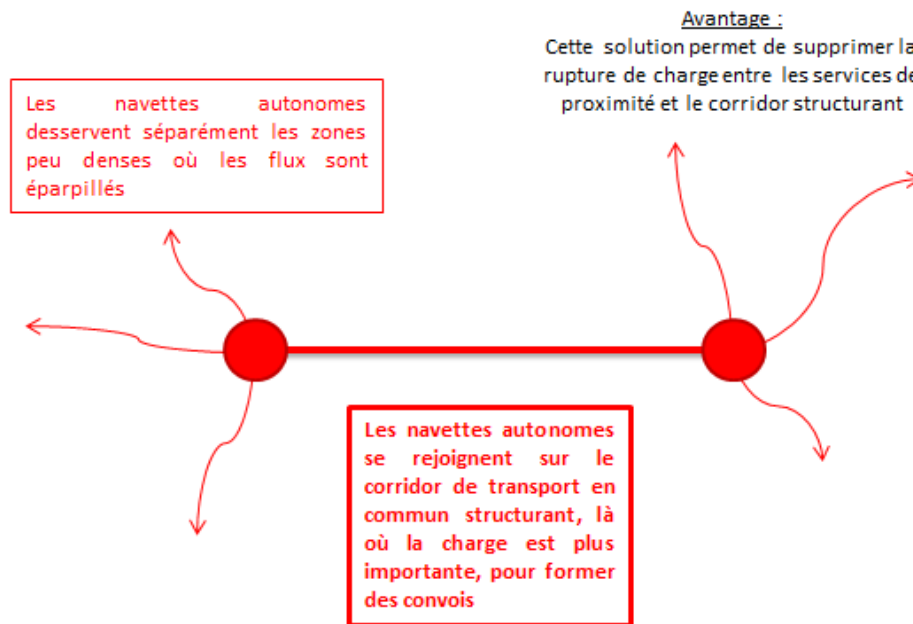


Figure 17 : Services de navette autonome qui assurent en même temps les dessertes de proximité et les dessertes des tronçons structurants. Réalisation : Rodolphe Murat

3.1.2.1 Description de ce type d'usage

L'intégration de navettes autonomes dans les réseaux de transport en commun permettrait d'offrir la possibilité aux usagers de réaliser des trajets de porte-à-porte en transport collectif. Cette solution nécessite l'utilisation d'un ensemble de navettes autonomes qui desserviraient des zones géographiques différentes sur les premiers et derniers kilomètres et un même tronçon sur la partie centrale des trajets.

Ces navettes autonomes desserviraient individuellement les segments des premiers et derniers kilomètres. Elles se rejoindraient, par la suite, à un pôle d'échanges ou une station de transport en commun pour former un peloton de plusieurs navettes autonomes qui assurerait la desserte du tronçon central du trajet, là où les différents flux convergent et où la fréquentation est la plus importante. Sur ce tronçon central du trajet, les navettes autonomes seraient liées les unes aux autres par le biais d'attaches physiques qui se déploieraient automatiquement ou par le biais d'une connexion sans fil qui permettrait aux navettes autonomes de circuler de façon synchronisée. La navette autonome située à l'avant du convoi contrôle les navettes autonomes reliées à elle et dirige

le convoi. Une fois qu'elles arrivent à proximité de leur zone de destination, les navettes autonomes du convoi quittent le peloton pour assurer la desserte du dernier kilomètre du déplacement. Le regroupement des navettes en peloton permet d'assurer la desserte du tronçon le plus fréquenté et remplace la ligne de transport en commun structurante existante.

L'exploitation en peloton routier, ou *platooning*, est une solution étudiée par l'entreprise Lohr Industrie. Ce groupe industriel est basé en Alsace, à Hangenbieten. Il est spécialisé dans la conception et la réalisation de systèmes de transport tels que les remorques de camions, les wagons ferroviaires ou les bus électriques (en collaboration avec Alstom). En plus de ces activités traditionnelles, Lohr Industrie a développé, dans le cadre du projet *Cristal*, un minibus électrique compact pouvant accueillir jusqu'à 18 personnes. La particularité de ce véhicule réside dans le fait qu'il peut être exploité de manière individuelle ou collective. En mode individuel, le véhicule est en libre-service et peut être réservé par un usager via une application mobile qui permet également de localiser le véhicule, de connaître sa disponibilité et de le réserver. En mode collectif, les véhicules forment un peloton et fonctionnent de manière synchronisé sur un itinéraire de transport.

Les navettes autonomes peuvent également être exploitées de manière mixte avec une conduite autonome, sans conducteur, sur une partie du trajet et une conduite manuelle pour les autres tronçons. L'autonomie du système de conduite serait privilégiée pour les dessertes fines du territoire, lorsque la navette autonome fonctionne seule et dessert des axes avec une faible circulation et des vitesses limitées. Le mode de conduite manuel serait réservé à la portion de ligne où les navettes autonomes se rejoignent et forment un peloton. Ce choix peut s'expliquer par le fait que les tronçons où se rejoignent les navettes autonomes, pour former un convoi, sont caractérisés par des axes avec une importante circulation et des vitesses plus élevées. Ces deux caractéristiques laissent à penser que les navettes autonomes pourraient avoir des difficultés à se déplacer et à anticiper les comportements des autres usagers. Cette solution peut être considérée comme une solution transitoire en attendant l'amélioration des systèmes de conduite autonomes.

La circulation en peloton en exploitation mixte est en expérimentation dans le domaine des déplacements sur autoroute. Le projet *Sartre* est un projet coordonné par le Royaume-Uni et qui vise à favoriser des évolutions dans l'utilisation des moyens de transport en mettant en place des convois routiers sécurisés sur les voies rapides. Le projet se matérialise de la manière suivante : un conducteur professionnel, situé à l'avant du convoi, contrôle et dirige les véhicules situés à l'arrière. Les véhicules qui circulent à l'extérieur du convoi peuvent se rapprocher pour s'intégrer à celui-ci. La liaison entre les véhicules est assurée par un signal électronique qui permet à chacun des véhicules

du convoi de gérer sa vitesse et de conserver une certaine distance avec les autres véhicules. A tout moment, un automobiliste peut quitter le convoi pour prendre une sortie d'autoroute. La difficulté de ce projet réside dans l'interaction entre les véhicules présents dans le convoi et les véhicules extérieurs à ce dernier.

3.1.2.2 Avantages de ce type d'usage

L'exploitation de navettes autonomes sur l'ensemble du trajet de l'utilisateur permet d'assurer un service continu sans ruptures de charge. L'utilisateur n'a plus besoin de changer de mode de déplacement (d'une navette autonome à un BHNS, ou l'inverse, par exemple). Cette desserte se rapproche d'une liaison de porte-à-porte où l'utilisateur bénéficiera de moyens de transport qui couvriront l'intégralité de son trajet.

Le regroupement et la circulation des navettes autonomes en convoi au niveau du corridor, autrefois desservi par la ligne de transport en commun structurante, permettent de mettre en place un service plus capacitair sur des axes où les flux sont plus importants. De plus, les services assurés par des navettes autonomes peuvent facilement être adaptés aux besoins. Il est possible d'ajouter ou d'enlever des navettes autonomes du service pour répondre aux besoins de mobilité. L'adaptabilité du service est une source d'économie car elle permet de calculer au plus juste les besoins en matériel roulant et d'éviter que des véhicules de transport en commun circulent à vide ou que le service soit saturé.

L'absence de conducteur dans les différents services assurés par des navettes autonomes permet de limiter les charges d'exploitation en réduisant les coûts liés à la masse salariale. Les anciens conducteurs peuvent être affectés à d'autres postes. Le personnel de conduite se verrait proposer des postes dans les centres de contrôle qui surveillent le fonctionnement du réseau, des postes d'agent d'accueil et de renseignement auprès des usagers du réseau ou encore des postes d'agent de surveillance du réseau et de contrôle des titres de transport. Le développement des automatismes pourrait permettre de réorienter le travail des agents vers les missions de services à destination des clients des réseaux tout en assurant une présence humaine dans les véhicules et les stations.

Enfin, ce mode d'utilisation des navettes autonomes peut être exploité intégralement en mode autonome ou en mode mixte. Le mode mixte comprend une exploitation en mode autonome sur les tronçons du premier et du dernier kilomètre et une exploitation en mode manuel sur le segment de ligne le plus fréquenté qui correspond au tronc commun où les navettes autonomes circulent en

convoi. La solution d'une exploitation mixte peut être une solution transitoire dans l'attente d'une amélioration des systèmes de conduite autonome. La conduite autonome serait utilisée dans des espaces où la circulation est plus faible et les vitesses modérées, tels que des tronçons routiers secondaires, des zones 30 et des zones de rencontre, ou dans des espaces piétonnisés.

Au niveau de l'organisation du service, les navettes autonomes se déplacent individuellement sur les tronçons des premiers et derniers kilomètres puis elles rejoignent un pôle d'échanges qui marque le début du corridor structurant et de la circulation en mode manuel. Les navettes autonomes se rejoignent et s'organisent en convoi d'une capacité similaire à un bus standard ou à un bus articulé. Le conducteur prend le contrôle de la navette située à l'avant du convoi. Cette navette est reliée aux autres véhicules par le biais d'attaches physiques qui se déploieraient automatiquement ou par le biais d'une connexion sans fil.

3.1.2.3 Inconvénients de ce type d'usage

Cette forme d'exploitation des navettes autonomes est néanmoins complexe à mettre en place. Elle associe des dessertes de proximité, avec des flux faibles et éclatés sur un territoire, et des dessertes structurantes sur des corridors où les flux sont importants et concentrés. Pour répondre correctement aux besoins, le service doit comprendre des dessertes de proximité, avec un nombre important de navettes autonomes éparpillées sur un territoire, et des dessertes structurantes avec un grand nombre de navettes autonomes qui se rejoignent pour former une multitude de convois de navettes aussi capacitaires que des bus standards ou articulés. De plus, l'opérateur de transport doit s'assurer de disposer d'un nombre suffisant de navettes autonomes au niveau des entrées et des sorties du corridor structurant pour répondre à la forte demande de transport sur le tronçon central.

Les petites navettes autonomes de quinze places, même si elles circulent en convoi, ne sont peut-être pas les véhicules les plus adaptés pour la desserte d'un corridor structurant. Contrairement à un bus, standard ou articulé, l'espace de voirie que ces navettes autonomes occupent n'est pas totalement utilisé pour le transport des usagers. L'espace où se trouve la connexion physique ou la marge de sécurité entre deux véhicules (pour le cas des connexions sans fil) représente une perte de capacité de transport, comparé à un bus standard d'un seul tenant ou à un bus articulé où l'espace de l'articulation peut accueillir des voyageurs. Pour une capacité de transport équivalente, les convois de navettes autonomes utiliseront une superficie d'espace public ou de voirie plus importante qu'un mode de transport collectif traditionnel (tramway, BHNS, ...). L'utilisation de convois de navettes autonomes ne permet donc pas d'optimiser l'utilisation de l'espace public et la capacité des voiries.

Enfin, ces services viendraient concurrencer les taxis en récupérant une partie des courses aujourd'hui réalisées par cette profession, notamment pour la desserte des premiers et des derniers kilomètres où les réseaux de transport en commun sont moins performants. Les solutions de transport permises par les navettes autonomes posent donc la question de la pérennité des solutions de mobilité proposées par les taxis.

3.2 Utilisation des navettes autonomes pour des déplacements de proximité

Les navettes autonomes peuvent également permettre de réaliser des déplacements de proximité. Elles seront alors utilisées pour assurer des dessertes sur des secteurs où les transports en commun sont peu attractifs (centres villes avec des rues étroites, secteurs périurbains à plus faible densité, ...), des services de transport à la demande ou des liaisons sur des sites fermés, privés ou publics.

3.2.1 Une solution pour répondre à des besoins de déplacement de proximité dans des secteurs où les transports sont peu attractifs

Les navettes autonomes pourraient permettre d'assurer les déplacements au sein de secteurs où les transports collectifs sont peu attractifs, que ce soit dans des centres villes où les rues sont étroites ou dans des secteurs à plus faible densité où les transports en commun ne sont pas performants du fait de l'éparpillement et de la faiblesse des flux. Dans ces deux cas, les navettes autonomes effectueraient la desserte interne de ces zones et répondraient essentiellement à des besoins de déplacement de proximité. Cependant, les correspondances avec les autres services de transport en commun restent possibles pour les personnes qui souhaitent poursuivre leur trajet.

Les navettes autonomes assurent une desserte de proximité des territoires.
 Les différents modes d'exploitation disponibles permettent d'adapter l'offre aux besoins de mobilité

(A noter que les arrêts peuvent être desservis systématiquement ou être à la demande)

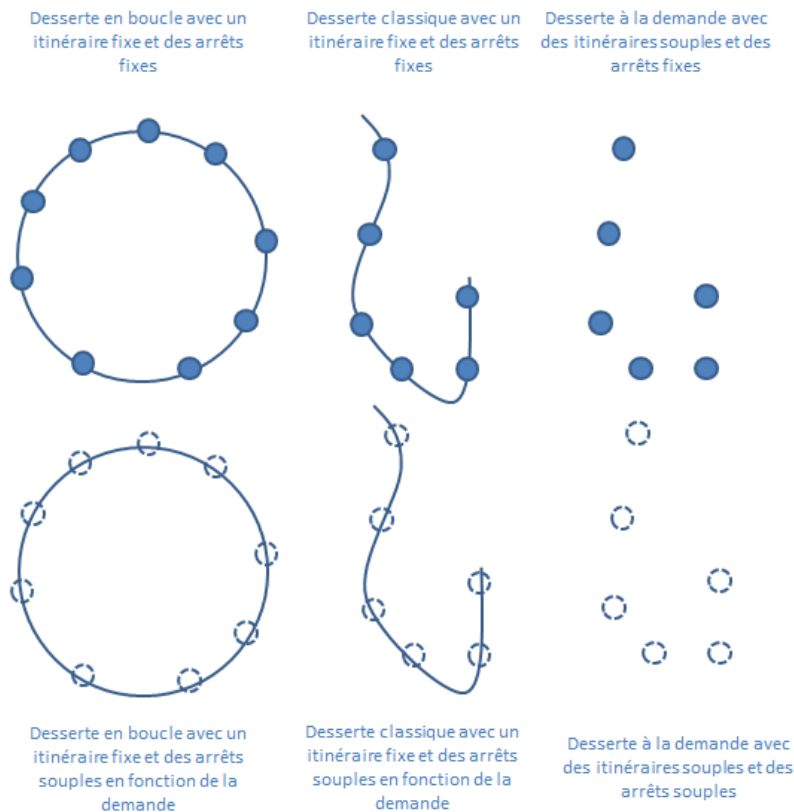


Figure 18 : Services de navette autonome pour les espaces où les transports en commun sont absents ou peu attractifs.
 Réalisation : Rodolphe Murat

3.2.1.1 Description de ces types d'usage

Les navettes autonomes assureraient, d'une part, la desserte fine des espaces de centre-ville. Elles remplaceraient les services de navette assurés en minibus qui sont peu performants ou seraient utilisées sur des espaces de centre-ville non desservis. L'absence de service de transport en commun ou leurs mauvaises performances dans ces secteurs peuvent s'expliquer par des raisons de coûts d'exploitation (un nombre plus élevé de conducteurs et de véhicules, avec une faible capacité, pour une fréquentation modérée), de contraintes techniques (étroitesse des rues, ...) et de nuisances (bruit des minibus, émissions des véhicules thermiques, ...).

Elles circuleraient dans des espaces contraints, en majorité des voiries piétonnes ou des zones de circulation apaisée, et assureraient une desserte fine des différents lieux d'intérêt du centre-ville. Les formes d'exploitation possibles sont variées. Les itinéraires empruntés par la navette autonome peuvent être fixes, la navette suit un itinéraire programmé, ou flexibles, la navette n'a pas

d'itinéraires programmés et les trajets sont déterminés en fonction des besoins des usagers. Du côté des arrêts, ceux-ci peuvent être fixes, les arrêts sont localisés et signalés, ou flexibles, les arrêts se font en fonction des besoins des usagers et de leurs lieux de départ et de destination. Les services assurés avec des arrêts fixes disposent de deux politiques d'arrêt avec des arrêts systématiques, la navette autonome dessert tous les arrêts, ou des arrêts à la demande, la navette autonome ne dessert que les arrêts où il y a des usagers qui souhaitent monter ou descendre. Dans le cadre d'un fonctionnement flexible, les usagers peuvent également interpeller la navette autonome pour qu'elle s'arrête et qu'ils puissent embarquer. Enfin, quelle que soit la forme d'exploitation du service, la navette autonome dispose d'un panneau d'affichage permettant de connaître sa destination.

D'autre part, les navettes autonomes pourraient permettre d'assurer la desserte dans des secteurs de faible densité, tels que des secteurs périurbains moins denses et essentiellement résidentiels, où l'éparpillement des flux rend les transports en commun peu performants ou peut dissuader la collectivité de mettre en place un service de transport partagé. L'éparpillement des flux nécessite la mise en place d'un grand nombre de minibus et de conducteurs pour répondre aux besoins de mobilité, ce qui rend le service plus coûteux pour la collectivité. Pour assurer un service de transport en commun performant et avec un coût modéré, des navettes autonomes pourraient être utilisées. Le service serait assuré avec un mode d'exploitation flexible, avec des itinéraires qui varient en fonction des besoins de déplacement des usagers, et des arrêts fixes, où la navette autonome s'arrête s'il y a une demande, ou flexibles, où les usagers choisissent les lieux de départ et d'arrivée.

3.2.1.2 Avantages de ces types d'usage

Les navettes autonomes pourraient représenter une solution efficace pour diminuer la place de la voiture individuelle dans les centres villes et les zones périurbaines de faible densité. En centre-ville, les services de navette autonome offriraient un service complémentaire aux modes de déplacements actifs et permettraient aux personnes qui ont des difficultés de mobilité, permanentes ou transitoires, de se déplacer au sein de leur périmètre de vie.

Ces navettes de petite taille s'inséreraient facilement dans les rues étroites des centres urbains. La faible emprise au sol et les vitesses limitées des navettes autonomes permettraient à ces véhicules de bien s'intégrer dans les espaces publics de centre-ville.

La mise en place des navettes autonomes pourraient s'accompagner d'une politique de restriction de l'accès de la voiture dans les centres urbains, par la piétonnisation de certains axes, la suppression du stationnement en hypercentre et la mise en place de zones de circulation apaisée. La limitation de la

circulation automobile serait une solution pour limiter les nuisances et permettrait d'améliorer le cadre de vie.

Dans les zones périurbaines peu denses, les services assurés par des navettes autonomes permettraient aux usagers de disposer d'une desserte de transport en commun performante aux amplitudes de fonctionnement plus larges, par rapport aux services conventionnels effectués en minibus, et qui s'adaptent aux besoins de mobilité des usagers. Ces services de mobilité performants inciteraient les usagers à utiliser de façon plus régulière les transports en commun.

Les services assurés par des navettes autonomes peuvent facilement être adaptés aux besoins. Il est possible d'ajouter ou d'enlever des navettes autonomes du service pour répondre aux besoins de mobilité. L'adaptabilité du service est une source d'économie car elle permet de calculer au plus juste les besoins en matériel roulant et d'éviter que des véhicules de transport en commun circulent à vide ou que le service soit saturé.

L'absence de conducteur dans les différents services assurés par des navettes autonomes permet de limiter les charges d'exploitation en réduisant les coûts liés à la masse salariale. De plus, les services assurés en minibus sont plus onéreux que les services assurés avec des bus standards ou articulés. Cette différence de coût s'explique par le fait que les services assurés en minibus nécessitent un nombre plus important de conducteurs et de bus pour transporter un même nombre de personnes. Les coûts de transport pour chaque usager sont donc plus élevés pour un service assuré en minibus que sur des lignes exploitées avec des bus standards ou articulés.

Enfin, le développement des navettes autonomes permettrait aux personnes qui ne peuvent acquérir un véhicule, qui n'ont pas la possibilité ou la capacité de conduire un véhicule ou qui ont des difficultés à se déplacer, de pouvoir utiliser ce nouveau service de transport en commun. Ces personnes pourraient se déplacer facilement dans leur secteur, à tout moment de la journée et pour un coût raisonnable. Les services assurés avec des navettes autonomes pourraient donc être une solution parfaitement adaptée aux problématiques de déplacement des personnes ayant des difficultés d'ordre financier, médical ou social.

3.2.1.3 Inconvénients de ces types d'usage

Les services de proximité des centres villes ou des zones périurbaines viendraient cependant concurrencer les modes actifs car ils répondraient à des besoins de déplacement sur de petites distances où la marche et le vélo sont des modes de déplacement performants. Ce risque est

d'autant plus fort pour les espaces de centre-ville où les navettes autonomes circuleraient sur des espaces contraints, en majorité piétonnisés ou apaisés, où les déplacements piétons sont majoritaires.

Ils viendraient également concurrencer les taxis en récupérant une partie des courses aujourd'hui réalisées par cette profession. Les taxis assurent aujourd'hui un service de mobilité complémentaire aux transports en commun et permettent, pour un tarif plus élevé, de rejoindre des zones où la desserte en transport en commun est mauvaise ou absente. Les solutions de transport permises par les navettes autonomes posent donc la question de la pérennité des solutions de mobilité proposées par les taxis.

Enfin, la mise en place de navettes autonomes sur des espaces contraints et majoritairement piétonnisés pose la question de l'occupation de l'espace public par les modes motorisés. L'utilisation de navettes autonomes dans des aires piétonnes peut paraître contradictoire par rapport aux objectifs des politiques publiques de mobilité qui visent à réduire la part des modes motorisés dans l'espace urbain et à rééquilibrer l'usage des espaces publics en faveur des modes actifs.

3.2.2 Une solution pour les services à la demande

Les services à la demande assurent une desserte complémentaire aux lignes régulières

Deux modes d'exploitation sont disponibles :

- 1- Itinéraires souples et des arrêts fixes à la demande
- 2- Itinéraires souples et des arrêts souples en fonction des demandes des utilisateurs

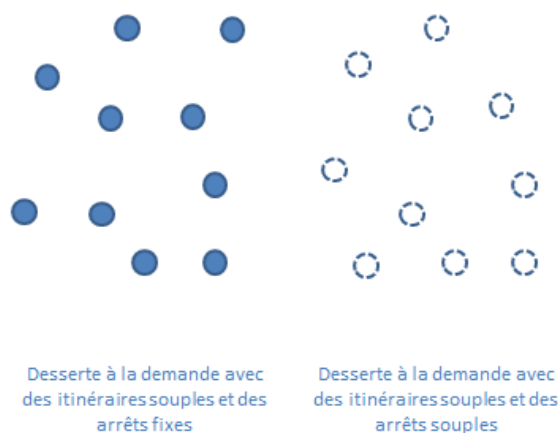


Figure 19 : Modes d'exploitation possibles avec les navettes autonomes pour assurer des services de transport à la demande. Réalisation : Rodolphe Murat

3.2.2.1 Description de ces types d'usage

Les navettes autonomes peuvent être mises en place sur des services à la demande pour répondre à des besoins de mobilité précis et personnalisés.

Elles seraient utilisées pour la desserte de zones moins denses où la voiture individuelle est le mode de déplacement principal et les transports en commun sont peu ou pas présents. Les navettes autonomes permettraient de limiter l'usage de la voiture et d'offrir une solution de mobilité partagée performante.

Le service serait assuré avec un mode d'exploitation flexible, avec des itinéraires qui varient en fonction des besoins de déplacement des usagers, et des arrêts fixes, où la navette autonome s'arrête s'il y a une demande, ou flexibles, où les usagers choisissent les lieux d'arrêt. Lorsque les navettes autonomes ne sont pas utilisées, elles pourraient être stationnées sur des aires d'attente pour éviter que ces véhicules ne circulent à vide en attendant les clients. Le service est accessible à partir d'une application mobile ou d'un site internet et les navettes autonomes peuvent également être hélées lorsqu'elles circulent ou utilisées lorsqu'elles sont sur les aires d'attente. Quelle que soit la forme d'exploitation du service, la navette autonome dispose d'un panneau d'affichage permettant de connaître sa destination.

Enfin, le retour des navettes vers l'aire d'attente peut se faire avec des voyageurs qui souhaitent se rendre dans la zone urbaine desservie ou en haut-le-pied en cas d'absence de voyageurs.

3.2.2.2 Avantages de ces types d'usage

La solution des navettes autonomes serait plus économique et plus adaptée qu'un service assuré en minibus, où le véhicule risque d'être surdimensionné par rapport aux besoins, ou qu'un service assuré par un taxi, où le nombre de personnes transportées est limité et le coût du déplacement élevé. De plus, les navettes autonomes pourraient fonctionner sur des amplitudes de fonctionnement plus larges qui se rapprochent de celles des lignes structurantes du réseau de transport en commun.

L'utilisation de navettes autonomes représente une solution pertinente pour augmenter la part modale des transports en commun et faire baisser la part de la voiture individuelle dans les zones urbaines moins denses. Les usagers pourraient bénéficier d'un service performant et compétitif avec

des amplitudes de fonctionnement larges, des navettes autonomes rapidement disponibles (avec une facilité de réservation par rapport aux services actuels qui demandent d'anticiper son déplacement) et une bonne couverture du territoire (avec les correspondances sur les lignes de transport en commun structurantes). Le service à la demande permet de se rapprocher d'un déplacement de porte-à-porte où l'utilisateur bénéficie d'un ou plusieurs moyens de transport pour la totalité de son trajet. Le porte-à-porte est ici disponible par l'utilisation combinée de lignes de transport en commun conventionnelles et de navettes autonomes sur un même trajet.

L'utilisation des navettes autonomes rend possible une plus grande souplesse dans l'exploitation. Les services assurés par des navettes autonomes peuvent facilement être adaptés aux besoins. Il est possible d'ajouter ou d'enlever des navettes autonomes du service pour répondre aux besoins de mobilité. L'adaptabilité du service est une source d'économie car elle permet de calculer au plus juste les besoins en matériel roulant et d'éviter que des véhicules de transport en commun circulent à vide ou que le service soit saturé.

Enfin, le développement des navettes autonomes permettrait aux personnes qui ne peuvent acquérir un véhicule, qui n'ont pas la possibilité ou la capacité de conduire un véhicule ou qui ont des difficultés à se déplacer, de pouvoir utiliser ce nouveau service de transport en commun. Ces personnes pourraient se déplacer dans leur secteur, à tout moment de la journée et pour un coût raisonnable. Les services assurés par des navettes autonomes pourraient être une solution aux problématiques de déplacement du segment de la population ayant des difficultés financières, médicales ou sociales.

3.2.2.3 Inconvénients de ces types d'usage

Les services de transport à la demande assurés par les navettes autonomes, avec des itinéraires et des arrêts qui s'adaptent aux besoins des usagers, se rapprocheraient des services fournis par les taxis. De plus, la concurrence avec les taxis serait renforcée par le faible coût pour l'utilisateur du service assuré par les navettes autonomes. Ces solutions de transport posent donc la question de la pérennité des services aujourd'hui assurés par les taxis.

3.2.3 Une solution pour la desserte de sites fermés, publics ou privés

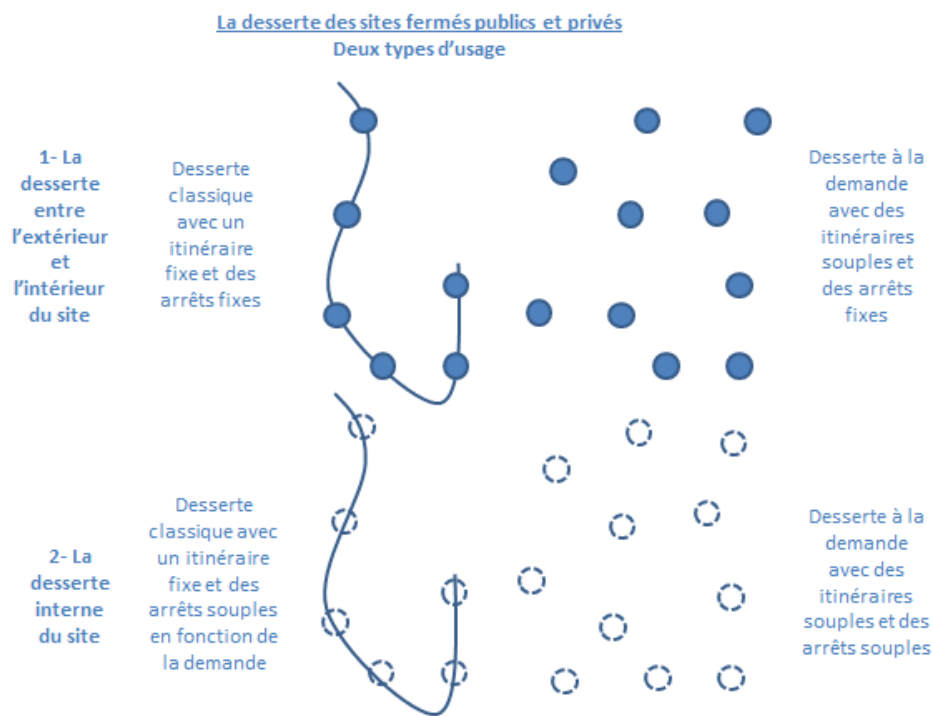


Figure 20 : Services de navette autonome pour les sites publics et privés fermés. Réalisation : Rodolphe Murat

3.2.3.1 Description de ces types d'usage

Les navettes autonomes peuvent être une solution pour la desserte des sites fermés tels que les aéroports, les campus, les centres commerciaux, les hôpitaux, les pôles de loisirs ou les zones d'activités. Ces nouveaux véhicules de transport en commun sont des outils de déplacement flexibles qui peuvent s'adapter à des demandes de déplacement variées et aux caractéristiques différentes. De plus, elles sont parfaitement adaptées au transport des personnes sur de petites distances et dans des périmètres précis.

Ces sites privés et publics s'étendent sur des superficies de taille variable. Ils peuvent ne pas être desservis correctement par les services de transports en commun ou ne pas disposer de liaisons en transport partagé.

Au sein des sites privés et publics, les navettes autonomes pourraient répondre à deux usages différents. Elles pourraient assurer des liaisons sur les premiers et derniers kilomètres en reliant les

services de transport en commun, les aires de stationnement et les différentes parties du site fermé. Elles pourraient également effectuer des liaisons internes au site en desservant tous les lieux d'intérêt de ce dernier.

L'exploitation du service entre les lignes de transport en commun, les aires de stationnement et le site peut se faire de manière classique. Les navettes autonomes fonctionnent sur un itinéraire fixe avec des arrêts et des horaires de passage précis. Au niveau de la politique d'arrêt, les véhicules peuvent s'arrêter systématiquement à tous les arrêts ou ne s'arrêter que si une personne souhaite monter ou descendre. Cette forme d'exploitation et ces deux politiques d'arrêt conviendraient pour des services de rabattement, où les flux sont concentrés sur des corridors et des périodes de pointe, depuis ou vers les lignes de transport en commun et les espaces de stationnement. Dans les situations où plusieurs navettes autonomes se suivent, elles pourraient former des convois, ce qui limiterait la consommation d'espace et le nombre de véhicules en circulation. Il faut cependant que le convoi ne dépasse pas une certaine longueur pour permettre la traversée des axes de circulation par les autres usagers. Les navettes autonomes pourraient quitter le convoi, à tout moment, en fonction de leur itinéraire et de leur lieu de destination.

Pour la desserte interne du site, là où les besoins de déplacement sont plus diversifiés, la navette autonome adoptera des modes d'exploitation plus flexibles. Le service fonctionnera avec des itinéraires souples, en fonction des besoins des utilisateurs, et des arrêts flexibles, en fonction des points de départ et d'arrivée des usagers. Lorsque les navettes autonomes ne sont pas utilisées, elles pourraient être stationnées sur des aires d'attente pour éviter que ces véhicules ne circulent à vide en attendant les clients. Le service serait accessible à partir d'une application mobile ou d'un site internet et les navettes autonomes pourraient également être hélées lorsqu'elles circulent ou utilisées lorsqu'elles sont sur les aires d'attente. Quelle que soit la forme d'exploitation du service, la navette autonome disposerait d'un panneau d'affichage permettant de connaître sa destination. Dans le cas où le propriétaire du site souhaite organiser les déplacements au sein de ces installations, il peut également opter pour un itinéraire fixe avec des arrêts souples qui s'adapteront aux demandes des usagers.

3.2.3.2 Avantages de ces types d'usage

La flexibilité des modes d'exploitation des navettes autonomes permet de répondre aux multiples besoins de mobilité et d'assurer les liaisons entre les services de transport en commun, les aires de stationnement et les différents espaces du site fermé. De plus, la mise en place de navettes

autonomes permet une plus grande souplesse dans l'adaptation de l'offre à la demande. Il est plus simple d'ajouter ou de retirer des véhicules du service et d'éviter les phénomènes de saturation ou de suroffre. L'adaptabilité du service permet de mettre en place un service économique qui répond aux besoins des usagers.

Les services de transport en commun au sein des sites fermés permettent de limiter l'utilisation de la voiture. Les véhicules individuels seraient stationnés aux portes du site sur des parkings prévus à cet effet et les personnes continueraient leur chemin à pied, à vélo ou en transport en commun (via le service assuré par les navettes autonomes). En l'absence de restrictions d'accès au site pour les véhicules motorisés individuels, le trafic automobile peut rester important dans l'enceinte du site fermé car les personnes se déplaçant en voiture souhaitent stationner leur véhicule au plus près du lieu de destination.

Enfin, la mise en place de services de navettes autonomes dans les sites fermés permet aux personnes ayant des difficultés à se déplacer, permanentes ou temporaires, de pouvoir facilement rejoindre les différentes zones du site. Ce service facilite les déplacements et rend le lieu accessible à tous.

3.2.3.3 Inconvénients de ces types d'usage

L'utilisation des navettes autonomes implique un changement de mode de transport aux portes du site. La personne se rendant dans le site doit descendre de la ligne de transport en commun, ou laisser sa voiture dans un parking, puis monter dans une navette autonome. Cette rupture de charge peut être contraignante si les temps d'attente sont longs, si l'offre n'est pas adaptée à la demande ou si les amplitudes de fonctionnement ne sont pas assez larges. Il est donc nécessaire de mettre en place une fréquence plus resserrée, notamment aux heures de pointe, et de cadencer l'offre sur les horaires de passage des services de transport en commun structurants qui passent à proximité. Si l'accès du site n'est pas limité pour les véhicules motorisés individuels, la rupture de charge pourrait dissuader les automobilistes de laisser leur véhicule sur les parkings en bordure de site.

Les navettes autonomes seraient également en concurrence avec les modes actifs qui peuvent être très utilisés pour des déplacements sur les sites fermés. La facilité d'usage des navettes autonomes aurait pour effet d'inciter les piétons et les cyclistes à abandonner leur mode de déplacement pour utiliser la navette autonome. De plus, pour que le service assuré par les navettes autonomes soit efficace et qu'il permette de limiter le nombre de voitures en circulation, l'accès automobile devra

être limité et des solutions de stationnement devront être installées en bordure du site fermé. L'accès au cœur du site se faisant à pied, grâce à l'aménagement de cheminements, à vélo, grâce à la création d'aménagements cyclables et de parcs à vélo (avec la possibilité d'installer un service de location de vélos), ou en transport en commun, par le biais des navettes autonomes.

3.3 Une solution pour les déplacements techniques, en-dehors des périodes d'exploitation

Enfin, les automatismes peuvent permettre de faire circuler des véhicules de transport en commun en mode automatique dans le cadre de déplacements techniques qui sont réalisés en-dehors des périodes d'exploitation.

3.3.2.1 Description de ces types d'usage

Les systèmes de conduite autonome peuvent être installés sur des véhicules de transport en commun fonctionnant en mode manuel lors des services commerciaux. Les automatismes seront alors utilisés dans des cas bien précis, en-dehors des temps de transport des voyageurs, comme pour le stationnement des véhicules dans les centres de remisage.

La RATP va tester, à partir de début 2018 et en collaboration avec l'entreprise Iveco Bus et le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), le remisage automatique des bus dans son dépôt de la rue de Lagny (20^{ème}) à Paris. Dans le cadre de cette expérimentation, le conducteur de bus laissera son véhicule à l'entrée du dépôt et le bus sera guidé par des capteurs qui lui indiqueront le chemin à parcourir et la place sur laquelle il doit se stationner. Cette expérimentation est réalisée dans le cadre du volet *Véhicules autonomes* du plan de *La Nouvelle France Industrielle*.

3.3.2.2 Avantages de ces types d'usage

Le remisage autonome des véhicules de transport en commun permet de limiter les besoins en main d'œuvre pour le stationnement des bus, tramways et métros et de libérer le personnel pour la réalisation d'autres tâches.

Ce mode de stationnement automatique permet également, dans le cas de véhicules de transport en commun non guidés, de rapprocher les véhicules les uns des autres et de gagner de la capacité dans les centres de remisage pour pouvoir y stationner plus de véhicules.

Enfin, le déploiement de systèmes de pilotage autonomes sur les véhicules de transport en commun classiques permet d'augmenter le nombre de systèmes autonomes en fonctionnement, de confronter les automatismes à de nouvelles situations et de perfectionner ces systèmes.

3.3.2.3 Inconvénients de ces types d'usage

La mise en place des fonctions de remisage autonome implique l'installation de nombreux capteurs sur les véhicules (LIDAR, caméras de stéréovision, capteurs d'odométrie et GPS), ainsi que la mise en place d'un système de pilotage automatique. Ces différents équipements ont un coût important qui devra être multiplié par le nombre de véhicules à équiper. De plus, des capteurs devront être installés dans le dépôt, sur chaque place de stationnement, pour signaler au véhicule sur quelle place il doit se stationner. En attendant l'évolution des technologies et leur démocratisation, les solutions de conduite autonome, dans le cadre d'une utilisation pour des services techniques, peuvent avoir un coût important pour la collectivité et la pertinence du système doit être vérifiée en comparant les avantages aux coûts.

IV- Les expérimentations de navette autonome

Les navettes autonomes des trois constructeurs, EasyMile, Navya et Local Motors, ont été développées en laboratoire et testées sur des sites fermés, avant d'être expérimentées sur des sites ouverts au public. Aujourd'hui, de nombreux réseaux de différents pays testent les navettes autonomes pour vérifier la fiabilité des technologies, analyser les champs d'utilisation de ces véhicules dans les réseaux de transport en commun, calculer les coûts d'exploitation et observer les réactions des usagers. Deux expérimentations de navettes autonomes à Lyon, en France, et à Sion, en Suisse, seront observées et analysées dans ce rapport.

4.1 Les expérimentations de navette autonome, des sites fermés aux espaces urbains

L'expérimentation des véhicules autonomes a débuté sur des sites fermés puis a évolué vers des sites ouverts. Cette évolution des conditions d'exploitation a été permise par l'amélioration des systèmes de conduite autonome et l'assouplissement des législations nationales, européennes et internationales en ce qui concerne les règles de circulation routière.

4.1.1 Cadre juridique des expérimentations : des espaces fermés aux espaces ouverts

L'expérimentation et la circulation des véhicules à délégation partielle ou totale de conduite, à l'époque du développement des premiers véhicules autonomes, n'étaient pas permises sur la voie publique du fait des législations internationales, européennes et nationales.

Les véhicules autonomes devaient donc être testés et expérimentés en laboratoire ou sur des sites fermés. Il a également été mis en place, par des universités, des centres de recherche et des entreprises privées, des zones d'expérimentation qui recréent un paysage urbain où il est possible de tester un véhicule autonome en simulant des conditions réelles de circulation.

Il existe en France une ville laboratoire basée sur le domaine de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry, sur la commune de Colombier-Saugnieu, dans le département du Rhône. Cette ville laboratoire est en fait une plate-forme d'expérimentation développée et gérée par la société Transpolis. Cette société a

été créée en 2011 par sept entreprises (Adetel, Aixam, Colas, Eve System, IFSTTAR¹⁵, Renault Trucks, Vibratec) et fait partie du pôle de compétitivité LUTB Transport and Mobility Systems¹⁶.

La société a développé une ville laboratoire de trente hectares dédiée à la mobilité urbaine et aux systèmes de transport innovants. Cet espace permet aux acteurs (entreprises, centres de recherche, universités, ...) qui travaillent sur les véhicules, les infrastructures et les mobiliers routiers et urbains de venir tester et mettre en valeur leurs produits. La société Transpolis offre à ses clients la possibilité de tester leur produit dans une approche systémique qui prend en compte les caractéristiques du produit testé, les sources et la consommation d'énergie, les réseaux, les équipements de la route, les infrastructures, l'internet des objets et le mobilier urbain. Cette installation permet également d'observer le comportement d'un véhicule, ou de tout autre dispositif, dans différents types d'espaces (urbains, périurbains, ...) tout en construisant des scénarios réalistes de la vie quotidienne.

Au deuxième semestre 2018, la ville laboratoire de la société Transpolis déménagera dans la plaine de l'Ain sur le terrain de l'ancien camp militaire des Fromentaux. Transpolis sera alors le plus grand espace d'essais contrôlés pour la mobilité urbaine en Europe avec une superficie de 80 hectares. La zone d'expérimentation accueillera une portion d'autoroute, une route sinueuse, des carrefours et tout autre environnement qui sera jugé utile pour les tests. Les aménagements seront modifiables en fonction des demandes des chercheurs et des industriels. Enfin, la société mettra à la disposition, de ses clients, des ingénieurs et des techniciens qui seront présents pour aider à imaginer des scénarios, des expérimentations et proposer des pistes de solution.

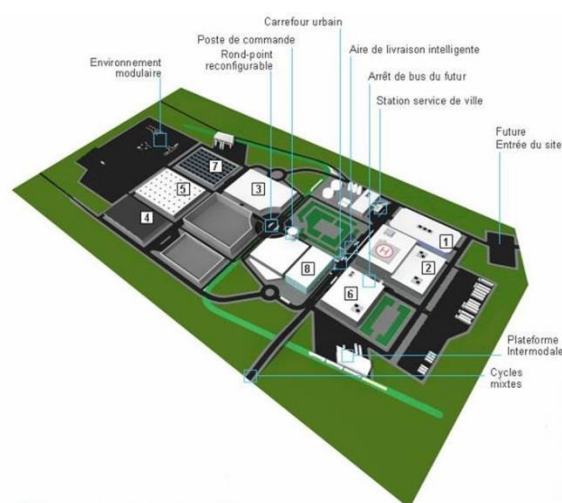


Figure 21 : La future installation de la société Transpolis. Source : Transpolis.fr

¹⁵ IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

¹⁶ LUTB Transport and Mobility Systems est un pôle de compétitivité centré sur la performance des systèmes de transports collectifs de personnes et de marchandises dans les métropoles.

Afin de permettre l'expérimentation et la circulation de véhicules à délégation partielle ou totale de conduite sur la voirie publique, il était nécessaire de modifier les législations internationales, européennes et nationales sur la circulation routière.

Au niveau international, les règles de conduite sont régies par la Convention de Vienne, terme qui désigne une dizaine de traités internationaux qui ont été signés à Vienne, en Autriche, et plus particulièrement par la Convention de Vienne sur la Circulation Routière. Cette convention est un traité international qui vise à faciliter la circulation et à améliorer la sécurité routière. Elle a été conclue le 8 novembre 1968 et est entrée en vigueur le 21 mai 1977.

La Convention de Vienne sur la Circulation Routière rend obligatoire le contrôle du véhicule par un conducteur. Cette obligation est spécifiée dans l'article n°8 relatif aux conducteurs. Il stipule, notamment, que « *tout véhicule en mouvement ou tout ensemble de véhicules en mouvement doit avoir un conducteur et que tout conducteur doit constamment avoir le contrôle de son véhicule* ».

Cependant, face aux progrès technologiques et au développement important des véhicules autonomes, la Convention de Vienne a été révisée le 23 mars 2016 au niveau du texte qui régle la circulation routière : « *Les systèmes de conduite automatisée seront explicitement autorisés sur les routes, à condition qu'ils soient conformes aux règlements des Nations Unies (ONU) sur les véhicules, ou qu'ils puissent être contrôlés voire désactivés par le conducteur* ».

Au niveau européen, la Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU) a annoncé certaines modifications de la Convention de Vienne afin de permettre l'utilisation, sous certaines conditions, de véhicules autonomes en Europe.

En France, la loi du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte et le volet *Véhicules autonomes* du plan industriel de *La Nouvelle France Industrielle* ont encouragé le développement des véhicules autonomes et l'évolution du cadre réglementaire et normatif. Un an après la loi du 17 août 2015, l'expérimentation des véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques est permise par l'ordonnance du 3 août 2016. Cette ordonnance stipule, dans son article n°1, que « *la circulation à des fins expérimentales d'un véhicule à délégation partielle ou totale de conduite sur une voie ouverte à la circulation publique est subordonnée à la délivrance d'une autorisation destinée à assurer la sécurité du déroulement de l'expérimentation* ». Cette ordonnance précise également que « *l'autorisation est accordée par le ministre chargé des transports après avis du ministère de l'intérieur, s'il y a lieu après avis du gestionnaire de la voirie, de l'autorité compétente en matière de la police de la circulation et de l'autorité organisatrice des transports concernés* ». Elle introduit donc la notion d'autorisation de circulation sur la voie publique pour l'expérimentation de

véhicule à délégation partielle ou totale de conduite et doit servir de base à un futur décret en Conseil d'Etat. Enfin, elle permet un régime d'autorisations interministérielles spécifiques.

En Suisse, tous les essais pilote de véhicules autonomes nécessitent une autorisation spéciale qui est délivrée par le Département fédéral de l'Environnement, des Transports, de l'Energie et de la Communication (DETEC) et l'Office Fédéral des ROutes (OFROU). Ces deux organismes ont notamment permis à l'entreprise CarPostal Suisse SA, une filiale de La Poste Suisse, de mettre en place son projet *SmartShuttle* et de tester des navettes autonomes.

4.1.2 Des expérimentations qui fleurissent en Europe

Depuis la mise en place de ces avancées législatives, les expérimentations de navette autonome sur l'espace public se multiplient et les situations de test sont variées. Tous les grands exploitants de transport en commun testent des navettes autonomes, que ce soit Kéolis, à Lyon, Transdev, qui a testé une navette autonome à Issy-les-Moulineaux, la RATP, à Paris, ou CarPostal, à Sion. Jean-Pierre Farandou, le Président Directeur Général de Kéolis, confiait d'ailleurs aux journalistes de la revue Ville, Rail et Transports, en novembre 2016, que la stratégie du groupe Kéolis était d'être présent sur le développement des navettes autonomes qui représentent un mode de transport innovant, pertinent et complémentaire des autres modes de transports en commun.

Les navettes autonomes circulent aujourd'hui sur des sites propres séparés des autres circulations, sur des aires piétonnes ouvertes aux modes actifs, sur des zones où la circulation est restreinte aux riverains, aux services techniques et aux secours et sur des zones en cohabitation avec de la circulation automobile. La grande majorité des expérimentations réalisées sont organisées en présence d'un opérateur qui se trouve dans la navette et vérifie le bon déroulement du test.

A Paris, les navettes autonomes ont d'abord été testées sur des zones fermées à la circulation. Une navette EZ10 a été présentée au public et expérimentée sur les berges de la Seine, fermées à la circulation automobile et empruntées uniquement par les modes actifs, en septembre 2016.

Cette expérimentation précédait une expérimentation plus longue, toujours sous la direction de la RATP, sur le pont Charles de Gaulle entre le 23 janvier et le 7 avril 2017. Les deux navettes EasyMile circulaient sur un couloir de bus fermé à toutes circulations et protégé par des glissières en béton armé. Les deux arrêts étaient positionnés aux extrémités du pont. Les navettes d'une capacité de six places assises fonctionnaient tous les jours, de 14h à 20h, avec un agent présent à bord. Le remisage et le rechargement se faisaient dans des containers placés aux extrémités du pont.

Un nouveau test est effectué dans la région parisienne, par l'exploitant Kéolis, filiale de la SNCF et de la Caisse de Dépôt et Placement du Québec, sur le parvis de La Défense. Deux navettes Arma de l'entreprise Navya, pouvant accueillir chacune jusqu'à quinze personnes, circulent sur la dalle piétonne de La Défense. Elles partent de la Grande Arche pour se diriger soit vers le Pôle universitaire Léonard-de-Vinci, au nord, soit vers la tour de la Société Générale, au sud-ouest. Le service est assuré du lundi au vendredi, de 8h à 20h. Le week-end, une troisième navette Arma est mise en service pour assurer un trajet le long de la perspective monumentale et faire découvrir le quartier de La Défense aux touristes. La vitesse des navettes a été limitée à 7 km/h pour ne pas gêner l'important flux de piétons et pour assurer la sécurité de tous les usagers qui fréquentent le parvis. Enfin, les navettes autonomes de cette expérimentation circuleront sans opérateur à bord à partir du mois de septembre 2017.

A Lyon, dans le nouveau quartier de La Confluence, deux navettes électriques Arma du constructeur Navya circulent de l'extrémité sud-est de la darse nautique, à l'angle du quai Arlès-Dufour et du cours Charlemagne, jusqu'à l'extrémité sud du quai Rambaud, le long de la Saône. Cette liaison assure la desserte du dernier et du premier kilomètre, au départ ou à destination de la station *Montrochet* du tramway T1. Les navettes autonomes se déplacent sur une zone à circulation limitée où se trouvent des piétons et des vélos, ainsi que des riverains, des véhicules techniques et des véhicules de secours. La navette circule du lundi au vendredi de 10h à 19h. Un opérateur est présent à bord pour vérifier le bon déroulement de l'exploitation.

A Sion, des navettes Navya Arma effectuent une boucle d'environ 1,5 km dans le centre-ville sur des aires piétonnes et des zones de rencontre. La particularité de cette expérimentation réside dans le fait que les navettes autonomes testées circulent au milieu des voitures sur les tronçons en zone de rencontre. Cette ligne permet de desservir finement le centre de Sion et de compléter l'offre de transport en commun. La navette circule du mardi au dimanche avec un opérateur à son bord.

Dans le même temps, des tests sont toujours effectués dans les villes laboratoires. L'entreprise Navya a notamment mis en circulation une de ces navettes Arma sur la ville témoin mCity qui se trouve à Ann Arbor au Michigan.



Figure 22 : Une navette Naveya Arma en circulation dans la ville témoin mCity de l'Université du Michigan. Source : navya.tech

mCity est une piste d'essai fermée de 100 000 m² qui recrée des conditions de test les plus réalistes possibles. Cette piste a été créée par les chercheurs de l'Université du Michigan et recrée une ville à l'échelle 1 où les véhicules autonomes effectuent des trajets en milieu urbain ou périurbain. mCity dispose de différentes configurations de voie et d'une variété d'équipements de la route (éclairage public, passages piétons, pistes cyclables, ...) et de signalisation (panneaux, feux tricolores, ...).

4.2 Présentation de deux cas d'expérimentation de navette autonome

Afin d'approfondir cette partie sur les expérimentations de navettes autonomes, les cas d'études de Lyon et de Sion vont être détaillés. Ces deux expérimentations permettent d'observer la circulation de navettes autonomes en milieu urbain, que ce soit sur une aire piétonne où l'accès des véhicules (riverains, services techniques et secours) est restreint ou sur un itinéraire comprenant des aires piétonnes et des zones de rencontre avec de la circulation automobile.

4.2.1 Lyon, une navette dans la *smart city lyonnaise*

Kéolis Lyon exploite, depuis le 2 septembre 2016, deux navettes autonomes Naveya Arma dans le nouveau quartier de La Confluence situé sur la partie sud de la presqu'île lyonnaise. La navette dessert une zone d'emplois et de loisirs excentrée située entre la Saône et le faisceau ferroviaire de la ligne allant de la gare de Lyon-Perrache à la gare de Givors-Ville. Cette expérimentation est effectuée en lien avec la société Naveya, le Sytral (Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise) et la Métropole de Lyon (Grand Lyon). Une société, Navly a été créée le temps du test. Cette société est détenue à 50% par Kéolis Lyon et à 50% par Naveya.

4.2.1.1 Présentation de la zone d'expérimentation

L'expérimentation se déroule dans le quartier de La Confluence, une ancienne zone d'activités transformée en un quartier mixte avec des administrations, un centre commercial, des entreprises, des espaces verts et des logements. Ce nouveau quartier vient prolonger le centre-ville de Lyon jusqu'à La Confluence du Rhône et de la Saône.

Le quartier de La Confluence est une vitrine de la ville durable et intelligente. Les bâtiments réalisés dans le cadre du projet respectent des normes strictes d'isolation et de consommation énergétique, les espaces publics favorisent la marche et le vélo, la place de la voiture est limitée, le quartier est desservi par une ligne de transport en commun en site propre et la végétation est très présente et gérée durablement.

La mise en place de navettes autonomes dans le quartier s'inscrit dans le cadre des mesures en faveur du développement durable et de la ville intelligente. Ce nouveau mode de transport est électrique et il représente une évolution vers des transports autonomes et flexibles qui peuvent s'adapter aux besoins de mobilité.

4.2.1.2 La ligne et les caractéristiques de l'exploitation

La ligne débute au bout de la darse nautique, à l'angle du quai Arlès-Dufour et du cours Charlemagne, près de la station de tramway T1. Elle remonte le quai Arlès-Dufour jusqu'à la Saône puis bifurque sur le quai Rambaud. Ensuite, la navette autonome descend le quai Rambaud vers le sud, jusqu'au niveau du bâtiment de GL Events, près du jardin Gabriel Rosset.

La ligne mesure 1 350 mètres et possède cinq arrêts. Deux arrêts se situent sur le quai Arlès-Dufour, l'un près de la station du tramway (*Charlemagne*) et l'autre au niveau de la passerelle piétonne qui surplombe la darse nautique (*Passerelle*). Chacun de ces deux arrêts se trouve à une extrémité du centre commercial, le premier fait la correspondance avec le réseau des Transports en Commun Lyonnais (TCL) et l'autre dessert le jardin aquatique Jean Couty, ainsi que l'entrée ouest du centre commercial. Les trois autres arrêts se situent sur le quai Rambaud, l'arrêt *Salins* dessert le sud du jardin aquatique, des entreprises et des lieux culturels, l'arrêt *Sucrière* dessert le lieu culturel et d'exposition La Sucrière, et l'arrêt *Magellan* dessert le sud du quai Rambaud avec ses sièges d'entreprise (Euronews, GL Events ...) et le jardin Gabriel Rosset. Sur les cinq arrêts de la ligne, deux

sont équipés de quais surélevés qui permettent l'accessibilité des personnes à mobilité réduite. En l'absence de quai, l'inclinaison de la palette du véhicule est trop importante pour permettre l'accès des personnes en fauteuil roulant.

La navette autonome parcourt les 1 350 mètres en 15 minutes de terminus à terminus. Un départ est effectué toutes les 30 minutes au niveau des terminus *Charlemagne* et *Magellan*. L'exploitation est assurée à partir de 10h et se termine à 18h ou à 19h, en fonction du niveau de charge de la batterie.

Un opérateur est toujours présent dans la navette pour s'assurer du bon fonctionnement du service et du véhicule. Il peut intervenir en cas de besoin et reprendre le contrôle de la navette à l'aide d'une manette (un joystick de la console Xbox). L'opérateur a également pour rôle d'informer le public sur le fonctionnement de l'expérimentation et de répondre à toutes les questions posées. Les opérateurs sont des agents de Kéolis qui travaillent habituellement sur le réseau TCL et qui ont reçu une courte formation. Le contrôle de terrain est complété par un suivi de l'exploitation depuis un centre de supervision.

4.2.1.3 Le type d'espace traversé

Sur toute la longueur de la ligne, les navettes autonomes circulent sur une aire piétonne où des véhicules de riverains (sur le quai Rambaud), des services techniques, des services de livraison ou des véhicules de secours peuvent circuler. La circulation automobile reste cependant faible. Les flux de piétons sont plus importants et une forte fréquentation piétonne peut-être constatée en milieu de semaine, les soirs de fin de semaine ou le week-end. L'importante fréquentation piétonne peut parfois ralentir la navette. Sa vitesse étant bridée à 20 km/h pendant la durée de l'expérimentation.

4.2.1.4 Le type de desserte

La ligne de l'expérimentation vient desservir une zone excentrée par rapport aux principaux axes de communication, le cours Charlemagne pour la circulation automobile et la ligne de tramway T1 pour les transports en commun. Les difficultés d'accès à cet espace et les nombreux flux issus des activités positionnées dans ce secteur créent des difficultés de circulation. Une seule ligne, la navette de centre-ville S1, dessert les bâtiments le long du quai Rambaud. Cette ligne ne répond cependant qu'à une petite partie des besoins. Elle possède une fréquence faible (un bus toutes les 12 minutes du lundi au vendredi) et des véhicules peu capacitaires (Midibus Heuliez GX 127 de 9.24 mètres contre 12 mètres pour un bus standard).

Le service assuré par la société Navly, filiale commune à Kéolis et Navya, vise à compléter l'offre existante et à tester la pertinence des navettes autonomes sur les liaisons du premier et du dernier kilomètre, en rabattement sur une ligne de transports en commun structurante.

4.2.1.5 Les véhicules, la recharge et le remisage

La ligne est parcourue par deux navettes autonomes électriques Arma du constructeur Navya. Les minibus sont dotés de capteurs (LIDAR, caméras de stéréovision, capteurs d'odométrie et GPS) qui leur permettent de se localiser dans l'espace, de se représenter leur environnement et de situer les personnes et objets en mouvement. Les navettes autonomes sont équipées d'une solution logicielle qui contrôle les véhicules et traite les informations récupérées par les capteurs.

Les deux navettes autonomes Navya Arma peuvent accueillir jusqu'à 11 personnes, dans le cadre de cette expérimentation, et leur vitesse est bridée à 20 m/h. Elle dispose d'une palette qui peut être dépliée par l'opérateur pour permettre l'accès du véhicule à une personne à mobilité réduite.

Les véhicules sont remisés dans deux containers situés sur un espace public, au sud du bâtiment de la Sucrière. Ces espaces de remisage ne sont pas climatisés ou chauffés, ce qui peut poser des problèmes de température pour les batteries au Lithium-Ion (LifeP04) qui ont besoin de conditions thermiques constantes et tempérées. Les containers sont reliés au réseau électrique et des prises sont disponibles à l'intérieur de ces derniers pour permettre la recharge des véhicules.

L'entretien courant des véhicules est réalisé sur place. Les navettes sont sorties des containers et l'entretien est réalisé sur l'espace public. Pour le gros entretien, les navettes sont emmenées en atelier.

4.2.1.6 Les aménagements mis en place

Pour permettre la mise en place de cette expérimentation, des aménagements mineurs de voirie ont été réalisés.

Un marquage au sol, sous la forme d'un logo bleu représentant un bus, a été réalisé à des intervalles réguliers sur tout le tracé de la ligne. Ce marquage permet d'informer les piétons et les autres usagers de l'espace public du passage fréquent d'une navette autonome et permet de renforcer la vigilance de chacun.

Le revêtement au sol a été repris à certains endroits pour assurer un meilleur confort de roulement et renforcer l'enrobé sur les lieux sujets à l'orniérage¹⁷ et aux nids de poule¹⁸.

Le mobilier urbain qui se trouvait sur la trajectoire du véhicule, ou à proximité immédiate de sa trajectoire, a été déplacé pour éviter tout arrêt non prévu au cours de l'exploitation.

Enfin, les arrêts ont été matérialisés par des totems qui viennent signaler le passage de la ligne et informer les usagers et les passants sur son fonctionnement (horaires de passage, amplitude de fonctionnement, ...), sur son tracé et sur les caractéristiques de l'expérimentation organisée par Navly. Deux arrêts de la ligne sont également équipés d'un quai et d'une rampe pour permettre la montée et la descente des personnes à mobilité réduite.

4.2.1.7 L'intégration du service dans le réseau de transport en commun

Le service est exploité indépendamment du réseau des Transports en Commun Lyonnais (TCL). La liaison n'est pas indiquée sur la signalétique du réseau (plans, fiches horaires, site internet, panneaux de jalonnement, ...) et la charte graphique des véhicules et des totems est différente de celle du réseau urbain.

Les véhicules de la société Navly peuvent être empruntés gratuitement et ne font pas partie de la tarification TCL.

Le service est en correspondance avec le réseau urbain à la station *Charlemagne* qui se situe à proximité de la station *Montrochet* du tramway T1. La navette assure la desserte du premier et du dernier kilomètre, vers ou depuis la station de tramway. Cependant, la signalétique du réseau TCL présente au niveau de la station de tramway n'indique pas la présence du service Navly et les horaires de la navette autonome ne sont pas cadencés avec les horaires de départ et d'arrivée du tramway.

Les deux offres de transport en commun fonctionnent indépendamment l'une de l'autre et la possible complémentarité entre les deux services n'est pas mise en valeur.

¹⁷ L'orniérage est une déformation permanente de la surface d'une chaussée, créant une ornière. Dictionnaire Le Larousse.

¹⁸ Un nid de poule est une cavité qui se creuse dans une chaussée. Dictionnaire Le Larousse.



Figure 23 : Plan du réseau TCL au niveau du sud de la Presqu'île et du pôle d'échanges de Perrache. La navette autonome est en correspondance avec le réseau TCL au niveau de la station *Hôtel de Région - Montrouchet* du tramway T1. Source : TCL – Kéolis Lyon. Réalisation : Rodolphe Murat.

4.2.1.8 Les acteurs et leur rôle

Le service est opéré par la société Navly, une société créée par l'exploitant de transport en commun Kéolis et la société spécialisée dans le développement de solutions de mobilité innovantes et dans la fabrication de navettes autonomes Nava. L'entreprise appartient à 50% à Kéolis et à 50% à Nava.

La société Kéolis Lyon est chargée de la gestion du personnel et de l'exploitation de la ligne et la société Nava apporte les navettes autonomes et gère la maintenance des véhicules.

La Métropole de Lyon (Grand Lyon) et le Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise (SYTRAL) se sont associés à ce projet d'expérimentation

La Métropole de Lyon collabore et soutient financièrement l'expérimentation Navly dans le cadre de sa démarche *ville intelligente* qui vise à répondre aux nouveaux défis urbains de la ville de demain (amélioration de la qualité de l'air, prise en compte du développement durable, augmentation de la population urbaine, ...) en tirant parti du numérique et des innovations.

Les missions du Grand Lyon dans le cadre de cette expérimentation sont d'accompagner la mise en place du service, d'observer les incidences sur l'espace public, d'analyser la cohabitation avec les autres usagers et de réfléchir aux mesures à prendre dans le cadre du développement de ce type de service de mobilité.

Le SYTRAL collabore et soutient financièrement l'expérimentation Navly dans le cadre du suivi des nouvelles formes de mobilité. Il souhaite observer l'acceptation de ce service par les usagers, vérifier la bonne intégration aux espaces publics, analyser la fiabilité du service et réfléchir aux différentes formes d'exploitation et de services possibles avec ce type de véhicule.

4.2.1.9 Les retours d'expérience

Dix mois après le début de l'expérimentation, en juillet 2017, plus de 20 000 passagers ont été transportés par les deux navettes autonomes Navya Arma. Les véhicules de l'expérimentation attirent les curieux et les touristes qui sont intrigués par ce nouveau mode de déplacement. L'expérimentation est également très observée et de nombreuses délégations étrangères viennent découvrir le service et les navettes autonomes.

Cependant, le service ne répond pas à l'objectif de départ qui était d'assurer une desserte du secteur pour les actifs. Il est très peu emprunté par les employés des différentes entreprises situées le long du quai Rambaud. Le faible engouement des actifs pour le service peut s'expliquer par le fait que la navette est lente, que son amplitude de fonctionnement varie en fonction de son niveau de charge (le service s'arrête entre 18h et 19h), que sa fréquence est faible (une navette toutes les 30 minutes) et qu'elle n'est pas accessible sur la pointe du matin (le service commence à 10h). Il est plus rapide de faire le trajet à pied de la station de tramway jusqu'au lieu de destination plutôt que d'attendre la navette. De plus, les faibles capacités d'accueil des navettes autonomes et l'importante fréquentation peuvent rendre l'accès au service compliqué. Ces différentes caractéristiques font du service de Lyon un service qui s'adresse à des personnes intéressées par la navette et qui ont du temps. A l'inverse, les salariés du quartier recherchent un service fiable, fréquent, rapide et avec une amplitude de fonctionnement plus large.

Les correspondances avec le réseau urbain des TCL sont à améliorer. Un jalonnement pourrait être mis en place entre la station *Montrochet* du tramway T1 et la station *Charlemagne* de la navette autonome, la charte graphique du service Navly pourrait reprendre celle du réseau urbain, les

horaires de la navette pourraient être cadencés avec ceux du tramway et l'amplitude de fonctionnement devrait être étendue à la pointe du matin.

Au niveau de la cohabitation avec les autres usagers, il n'y a pas de problème à signaler du côté de l'exploitant Kéolis Lyon. La cohabitation avec les piétons et les vélos se passe bien, il n'y a pas eu d'incidents. Cependant, les trajectoires parfois imprévisibles des modes actifs peuvent provoquer un arrêt momentané du service pendant quelques secondes.

Au niveau technique, le fonctionnement de la navette est satisfaisant. Il n'y a pas de retours de dysfonctionnements. Les deux navettes assurent leur service correctement. Néanmoins, les capacités des batteries ne permettent pas de couvrir l'intégralité d'une journée d'exploitation et l'amplitude de fonctionnement du service a été réduite. La navette commence son service à 10h du matin, après la pointe du matin, et s'arrête aux alentours de 18h ou 19h.

Enfin, cette expérimentation pose la question de la place des navettes autonomes sur l'espace public. Les navettes autonomes, en tant que véhicule routier, devraient circuler sur les voies de circulation automobile plutôt que sur les espaces réservés aux modes actifs. Ces navettes autonomes sont des véhicules de transport en commun qui pourraient circuler sur des voies routières, avec, dans un premier temps, une circulation sur des voies à vitesse modérée pour faciliter l'exploitation. Dans le cadre de l'expérimentation de Lyon, les navettes empiètent sur l'espace des piétons. L'utilisation d'un espace piéton par des véhicules motorisés est en contradiction avec les objectifs des politiques publiques de mobilité qui visent à rééquilibrer la place de chaque mode sur l'espace public et à donner plus de place aux modes actifs.

4.2.2 Sion, une navette dans le centre ancien

La ville de Sion, située dans le canton du Valais en Suisse, accueille l'expérimentation de deux navettes autonomes Navya Arma depuis le 23 juin 2016.

Dans le cadre de cette expérimentation menée par la société CarPostal Suisse SA, filiale de La Poste Suisse, les deux navettes autonomes effectuent une desserte de proximité et parcourent le centre-ville sur une liaison en forme de boucle. Particularité de cette expérimentation, les navettes circulent sur des zones piétonnes et des zones à vitesse modérée, ainsi qu'une rue à 50km/h (la rue Mathieu-Schiner), où elles cohabitent avec la circulation routière.

Cette expérimentation permet d'analyser la pertinence des navettes autonomes dans les réseaux de transport en commun, de vérifier leur bonne intégration dans l'espace public, d'observer la

cohabitation avec les autres usagers, de vérifier l'acceptation de ce système et de voir la pertinence de ce nouveau mode de déplacement pour desservir des zones où les transports en commun sont aujourd'hui absents.

CarPostal Suisse SA souligne d'ailleurs que le but n'est pas de remplacer les bus par des navettes autonomes mais de diversifier les moyens de transport afin de satisfaire la plupart des besoins de mobilité des usagers.

4.2.2.1 Présentation de la zone d'expérimentation

Les navettes autonomes circulent dans l'hypercentre de la ville de Sion. Sion est une ville de 32 500 habitants¹⁹ située en Suisse dans le canton du Valais.

Les navettes autonomes desservent la partie historique de la ville qui est composée de nombreuses aires piétonnes, avec un accès limité aux voitures des riverains (sous certaines conditions), aux cyclistes, aux livraisons (sous certaines conditions), aux services publics et aux services de secours, de rues où les vitesses de circulation sont modérées (zones de rencontre) et d'axes à 50km/h.

Les zones à vitesse modérée sont réaménagées avec un traitement de l'espace public où les espaces destinés aux piétons et les espaces de circulation sont à la même hauteur. La mise en place d'une même hauteur de façade à façade permet de faciliter les déplacements à pied et de limiter les vitesses des véhicules motorisés.

Les espaces traversés par les navettes autonomes comprennent de nombreux commerces, restaurants et bars. Le lieu est animé, il comprend de nombreuses terrasses et peut accueillir des flux de piétons importants.

Les navettes autonomes desservent les lieux de centralité de l'hypercentre de Sion, tels que la place du Midi ou la place de la Planta, des monuments emblématiques de la ville, tels que la cathédrale Notre Dame de Sion, l'église Saint-Théodule et l'Hôtel de ville, et passent à proximité de musées, tels que le musée d'Art du Valais ou le musée de l'Evêché.

¹⁹ Données issues du cahier statistiques de la Ville de Sion de l'année 2015. Cahier édité par la Ville de Sion.

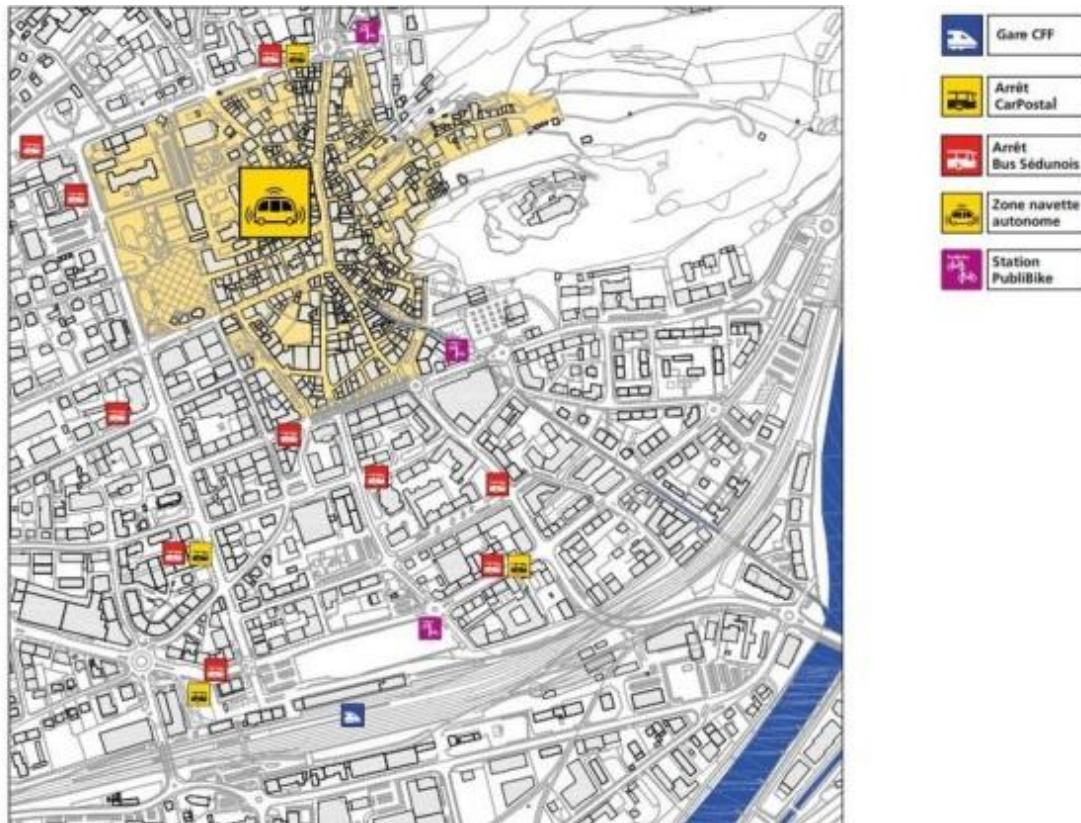


Figure 24 : Zoom sur le centre de Sion avec le périmètre de la vieille ville en orange. Les deux navettes autonomes Navya Arma desservent finement ce secteur et complètent le réseau urbain des Bus Sédunois. Source : CarPostal Suisse SA

4.2.2.2 La ligne et les caractéristiques de l'exploitation

Les navettes autonomes commencent leur parcours à l'arrêt *Place du Midi*, l'une des places emblématiques du centre-ville de Sion, au niveau de l'extrémité sud de la vieille ville. Elles traversent la Sionne, une rivière et un affluent du Rhône, tournent sur la place des Tanneries, traversent la rue des Tanneries puis rejoignent la rue du Rhône. Les navettes autonomes arrivent alors sur la rue du Grand-Pont, un axe historique, très fréquenté et commerçant avec de nombreuses boutiques et terrasses. Au niveau de la fontaine, les navettes autonomes tournent sur la rue de Savièse puis prennent la rue Mathieu-Schiner qui passe à proximité de la Cathédrale Notre Dame de Sion et du tribunal cantonal. Le service prend ensuite la rue de la Tour pour rejoindre la place de la Planta, une autre place emblématique du centre-ville de Sion, où se trouve l'office du tourisme. Les navettes autonomes empruntent ensuite une petite portion de la rue de Lausanne puis la rue des remparts, la ruelle des Galeries et la rue de la Porte-Neuve. Le service termine sa desserte du centre-ville de Sion en passant, soit par la ruelle du midi puis en traversant l'espace piéton de la place du Midi, soit en rejoignant la place du Midi par la rue de la Porte-Neuve et en circulant ensuite sur les voies de

circulation automobile de la place du Midi, jusqu'au rond-point faisant le lien entre les rues de la Dixence, du Rhône et du Scex et la place du Midi.

Les navettes autonomes cohabitent avec la circulation automobile sur les rues du Grand-Pont (rue à la circulation réglementée), de Lausanne, de Mathieu-Schiner et des Remparts, ainsi que sur la place du Midi (lorsque la navette circule sur la partie sud de la place où se trouve la circulation automobile). Ces espaces de circulation automobile sont des zones à vitesse modérée (zones de rencontre), à l'exception de la rue Mathieu-Schiner qui est limitée à 50m/h. Les autres espaces traversés sont des espaces réservés aux piétons. Il existe des itinéraires de contournement, en cas de perturbation ou de marché, par les rues de Lausanne (le service ne dessert plus que la partie nord de la vieille ville de Sion) et des Remparts (le service ne dessert plus la ruelle des Galeries et la rue de la Porte-Neuve) ou par la face nord de la place du Midi, sur la partie piétonne (en cas de perturbation de la circulation sur l'espace emprunté par le flux motorisé, en face sud).

La ligne mesure 1 500 mètres et compte huit arrêts. Les deux principaux arrêts se situent sur les places du Midi et de la Planta. L'arrêt de la place du Midi est situé à 600 mètres, à vol d'oiseau, de la gare de Sion où se trouve un pôle d'échanges entre les lignes de train CFF, les TGV Lyria (TGV franco-suisse), les lignes routières des transports en commun de Sion et les lignes routières du canton. La place du Midi est composée de nombreuses boutiques, d'un supermarché et de nombreuses terrasses. A proximité de la place, deux parkings permettent de laisser sa voiture en bordure de l'hypercentre et de continuer à pied ou de prendre la navette autonome pour poursuivre son trajet en cœur de ville. L'arrêt de la place de la Planta dessert la plus grande place de la ville, de nombreux équipements situés à proximité, dont l'office du tourisme et le tribunal cantonal, et des monuments, tels que la cathédrale Notre Dame de Sion et l'église Saint Théodule.

Les navettes autonomes parcourent les 1 500 mètres de la ligne en une quinzaine de minutes. L'exploitation est assurée six jours sur sept, les navettes ne circulent pas le lundi. Elle circule de 13h à 18h du mardi au jeudi et le week-end. Du fait de la présence hebdomadaire d'un marché, le service ne fonctionne que de 15h à 19h le vendredi.

Un opérateur est toujours présent dans la navette pour s'assurer du bon fonctionnement du service et du véhicule. Il peut intervenir en cas de besoin et reprendre le contrôle de la navette à l'aide d'une manette (un joystick de la console Xbox). L'opérateur a également pour rôle d'informer le public sur le fonctionnement du service et de répondre à toutes les questions posées.

L'accès au service est gratuit et il est possible de télécharger une application mobile, du nom de « *SmartShuttle* », qui permet de connaître la position exacte des deux navettes autonomes et les conditions de fonctionnement du service.

4.2.2.3 Le type d'espace traversé



Figure 25 : Carte de l'hypercentre de Sion avec en bleu, les aires piétonnes, en jaune, les zones de rencontre, en rose, les zones 30, et en blanc, les zones où il n'existe pas de limitation de vitesse. Source : Ville de Sion

L'espace desservi par les navettes autonomes est composé de zones de rencontre (les rues du Grand-Pont, de Lausanne et des Remparts, ainsi que la place du Midi), d'aires piétonnes et d'une rue à 50 km/h (la rue Mathieu-Schiner).

Les zones de rencontre sont implantées sur les derniers axes de la vieille ville qui sont traversés par la circulation routière. Elles disposent de revêtements à niveau de façade à façade. Les aménagements comportent des bancs pour les piétons et un éclairage aux dimensions appropriées pour les modes actifs. L'aménagement des zones de rencontre s'est accompagné d'une réduction des espaces de stationnement pour libérer l'espace et réduire significativement les flux automobiles dans l'hypercentre de la ville.

L'espace piéton couvre la majorité de la vieille ville de Sion. La circulation automobile y est limitée, seuls les riverains (sous certaines conditions), les livreurs (sous certaines conditions), les véhicules

des services publics et les secours peuvent y accéder. Ces zones piétonnes accueillent des flux piétons importants et toutes les circulations de transit sont interdites.

La rue Mathieu-Schiner est la seule rue empruntée par les navettes autonomes dont la limitation de vitesse est à 50 km/h. Cette rue est un axe de desserte secondaire qui accueille un double-sens cyclable, autorisant les cyclistes à emprunter la rue dans les deux sens de circulation, et permet une desserte de proximité de l'extrémité nord de l'hypercentre de Sion.

4.2.2.4 Le type de desserte

Les navettes autonomes de l'expérimentation de Sion assurent une desserte de proximité en desservant finement la vieille ville avec ses commerces, ses monuments et ses équipements.

Les véhicules autonomes sont en correspondance avec les transports urbains de Sion au niveau des places du Midi et de la Planta. Ils permettent aux usagers des transports en commun de poursuivre leur trajet au cœur de la vieille ville, sur des artères étroites où seules les navettes autonomes peuvent circuler, et de les approcher au maximum de leur lieu de destination.

Le service a également une fonction de navette de centre-ville. Il assure une boucle au sein de l'hypercentre de Sion et permet de répondre aux besoins des personnes qui souhaitent se déplacer à l'intérieur de ce périmètre.

Enfin, ce service assure une desserte touristique en permettant aux touristes de visiter les principales rues et places de la vieille ville de Sion, de découvrir les monuments de la ville et de se rendre à l'office du tourisme, place de la Planta.

4.2.2.5 Les véhicules, la recharge et le remisage

La ligne est parcourue par deux navettes autonomes Navya Arma 100% électriques qui se nomment Tourbillon et Valère. Les minibus sont dotés de capteurs (LIDAR, caméras de stéréovision, capteurs d'odométrie et GPS) qui leur permettent de se localiser dans l'espace, de se représenter leur environnement et de situer les personnes et objets en mouvement. Les navettes autonomes sont équipées d'une solution logicielle qui contrôle les véhicules et traite les informations récupérées par les capteurs. La charge des navettes autonomes est limitée à huit personnes assises plus un accompagnateur pendant le temps de l'expérimentation.

La vitesse des véhicules est limitée à 20km/h pour permettre un déplacement en toute sécurité et assurer une bonne cohabitation avec les autres usagers de l'espace public. Les navettes autonomes ne sont pas accessibles aux personnes à mobilité réduite du fait de la hauteur d'accès aux véhicules qui est de 20 centimètres. Cependant, l'opérateur présent dans la navette autonome peut aider une personne à monter ou descendre du véhicule, selon les besoins et les possibilités.

4.2.2.6 Les aménagements mis en place

Pour permettre la mise en place de cette expérimentation, des aménagements mineurs de voirie ont été réalisés.

Le revêtement au sol a été repris à certains endroits pour assurer un meilleur confort de roulement et renforcer l'enrobé sur les lieux sujets à l'orniérage et aux nids de poule.

Le mobilier urbain qui se trouvait sur la trajectoire du véhicule, ou à proximité immédiate de sa trajectoire, a été déplacé pour éviter tout arrêt non prévu au cours de l'exploitation.

Enfin, une borne interactive a été placée au début du parcours, sur la place du Midi. Sur cette borne se trouve toutes les informations utiles concernant le fonctionnement du service.

4.2.2.7 L'intégration du service dans le réseau de transport en commun

Le service est exploité indépendamment du réseau des transports en commun *Bus Sédunois*. La liaison n'est pas indiquée sur le plan du réseau et la charte graphique des véhicules et des totems reprend celle des services de CarPostal Suisse.

Les véhicules de l'expérimentation sont accessibles gratuitement et ne font pas partie de la tarification du réseau *Bus Sédunois*.

Les navettes autonomes sont en correspondance avec les lignes de bus du réseau sédunois aux arrêts *Planta* et *Place du Midi*. L'arrêt *Place du Midi* est un arrêt situé sur un tronç commun, ce qui permet une correspondance avec un nombre important de services de transport en commun.

Les deux services sont donc complémentaires, les navettes autonomes permettent de desservir finement l'hypercentre de Sion et complètent l'offre de transport public de l'agglomération.



Figure 26 : Le cœur du réseau des transports en commun séduinois. La navette autonome fonctionne dans le secteur de la vieille ville et assure des correspondances avec le réseau des transports en commun aux arrêts Planta et Place du Midi.

Source : CarPostal Suisse SA

4.2.2.8 Les acteurs et leur rôle

L'expérimentation de Sion est issue d'une demande de La Poste Suisse. Le projet est mené en partenariat avec la ville de Sion, le canton du Valais et l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Les tests sont menés dans le cadre du laboratoire de mobilité (Mobility Lab Sion-Valais). Le Mobility Lab Sion-Valais est une organisation virtuelle qui développe des synergies interdisciplinaires autour de la mobilité et présente les expérimentations et les nouvelles solutions mises en œuvre dans ce domaine. Cette organisation a pour objectif d'imaginer, de développer et de tester des solutions innovantes en matière de mobilité. Elle comprend un certain nombre de partenaires, dont La Poste Suisse SA, le canton du Valais, la ville de Sion, l'EPFL et la Hes-SO Valais-Wallis.

La société CarPostal Suisse SA gère l'exploitation du service. Le système de gestion de la navigation est fourni par la start-up suisse BestMile, spécialisée dans la gestion par le cloud des flottes de véhicules autonomes. Les véhicules sont fournis par l'entreprise française Navya.

Cette expérience de terrain permet à l'EPFL de travailler sur l'intégration d'une flotte de navettes autonomes dans un système de transport en commun. D'un point de vue scientifique, ce projet permettra aux chercheurs du Laboratoire de systèmes de transports urbains (LUTS) de développer un système de gestion de flotte qui tient compte de la diversité des situations rencontrées par les véhicules autonomes. À terme, ils comptent proposer des trajets flexibles avec un service à la demande afin de compléter les transports en commun existants, de l'arrêt le plus proche jusqu'à la destination finale.

Enfin, la mise en place de navettes autonomes sur l'espace public a nécessité des autorisations spéciales de la part des autorités. L'autorisation de circulation des véhicules autonomes a été accordée par l'Office Fédéral des Routes et le Service des Routes Valaisan qui ont examinés les aspects techniques et juridiques de l'expérimentation. Les navettes autonomes ont dû être adaptées pour satisfaire aux normes en vigueur, avec notamment la mise en place d'une seconde batterie, de la climatisation et d'un essuie-glace pour la vitre frontale.

4.2.2.9 Les retours d'expérience

Les navettes autonomes sont très utilisées. 21 500 personnes ont été transportées après une année d'exploitation. Les personnes ayant utilisé le service ont parfois été sceptiques avant de monter à bord mais les avis ont été la plupart du temps très positifs après le voyage. Cependant, la plupart des personnes qui montent dans les navettes autonomes les utilisent sur un mode touristique et les prennent pour effectuer une boucle complète.

Sur le parcours, les navettes autonomes roulent à une vitesse moyenne de 6 km/h, ce qui est faible et peut s'expliquer par une exploitation saccadée. Elles parcourent les 1 500 mètres en quinze minutes environ.

Le service s'est, jusqu'à aujourd'hui, bien déroulé et l'exploitant est satisfait de la stabilité et de la disponibilité des véhicules. Cependant, quelques bugs ont été constatés les premiers jours, ce qui obligeait les opérateurs présents à bord des véhicules à faire appel à un technicien pour redémarrer les véhicules. Le fonctionnement des navettes autonomes est saccadé, elles s'arrêtent régulièrement

au cours du trajet. Les déplacements des piétons et cyclistes, parfois difficilement prévisibles, peuvent entraîner l'arrêt de la navette pendant quelques secondes. Par-exemple, si un enfant, en trottinette ou à vélo, déboule sur la gauche de la navette autonome, dépasse le véhicule et avance droit devant elle, les algorithmes mathématiques de la navette autonome auront des difficultés à évaluer la situation et l'absence de dangers. La navette autonome s'arrêtera, le temps que l'enfant se soit éloigné et que les algorithmes mathématiques ne détectent plus de dangers. Les véhicules mal garés peuvent également entraver la circulation de la navette s'ils sont stationnés dans la bande de roulement de cette dernière. L'opérateur présent à bord doit alors prendre possession de la manette permettant de contrôler le véhicule et contourner l'obstacle en mode manuel.

En une année d'exploitation, le service a notamment connu un arrêt d'exploitation suite à la collision d'une navette autonome avec le hayon ouvert d'un véhicule de livraison. Le 21 septembre 2016 à 17h40, un camion de livraison était stationné sur la place du Midi. Ses hayons arrière étaient ouverts pour permettre le déchargement des marchandises. Un des deux hayons empiétait sur la trajectoire de la navette autonome, au niveau d'un point du parcours où la navette autonome effectue un virage sur la gauche. La navette autonome transportait trois personnes et circulait à une vitesse de 10 km/h. En arrivant au niveau du camion de livraison, elle n'a pas bien analysé l'obstacle. D'ailleurs ni les capteurs LIDAR, ni l'opérateur à bord n'ont identifié le hayon comme un obstacle sur la trajectoire de la navette. Le côté de la navette autonome situé face au camion a percuté le hayon, une vitre de la navette autonome s'est cassée et la porte arrière du camion a été légèrement abîmée. L'exploitation de la navette autonome a repris deux semaines après cet incident, une fois les analyses effectuées. Il a également été demandé de réaliser des ajustements techniques permettant notamment l'augmentation de la marge de sécurité dans les virages.

L'expérimentation de ces deux navettes autonomes doit durer jusqu'en octobre 2017 et pourrait être prolongée au-delà. De plus, si les tests sont concluants, l'introduction de véhicules autonomes pourrait être envisagée sur d'autres parcours en ville de Sion. Une demande pour relier la gare de Sion a notamment été déposée par la société CarPostal Suisse SA auprès de l'Office Fédéral des Transports.

V- Synthèse et enseignements apportés par les premières circulations de navette autonome

Les nombreuses expérimentations mises en place et les premières circulations de navettes autonomes en mode commercial permettent de connaître les différentes utilisations possibles de ces véhicules ainsi que leur place et leurs rôles au sein des réseaux de transports en commun. Elles apportent également des informations sur les bénéfices apportés par ces véhicules, les inconvénients à surmonter et les défis à relever.

5.1 Les bénéfices apportés par la mise en place de navettes autonomes

Les navettes autonomes de transport public représentent un nouveau moyen de transport dans la large palette des déplacements collectifs (métro, funiculaire, tramway, transport par câble, bus à haut niveau de service, ...). C'est un mode de déplacement pertinent qui s'adapte aux besoins de mobilité des usagers, permet de limiter les coûts et représente une solution pour développer l'usage des transports partagés face aux transports individuels.

5.1.1 Les navettes autonomes, un mode de transport en commun qui s'adapte aux différents besoins de mobilité

Les navettes autonomes sont des véhicules qui s'adaptent aux différents besoins de mobilité grâce à cinq modes de desserte, à une plus grande amplitude de fonctionnement, à une plus grande souplesse dans l'exploitation, notamment par des ajouts et retraits simplifiés de véhicules, et à la possibilité de faire circuler les véhicules en convoi pour augmenter l'offre.

Les navettes autonomes disposent de cinq modes de fonctionnement. Elles peuvent circuler sur des itinéraires fixes avec des arrêts systématiques, sur des itinéraires fixes avec des arrêts à la demande (en fonction des descentes et des montées des voyageurs), sur des itinéraires souples avec des arrêts à la demande (avec des itinéraires qui s'adaptent aux besoins des usagers et des arrêts fixes où la navette autonome ne s'arrête que lorsqu'une demande existe), sur des itinéraires fixes avec des arrêts souples (la navette s'arrête à n'importe quel endroit de la ligne, en fonction des demandes des usagers) et des itinéraires souples avec des arrêts souples (les itinéraires et les arrêts varient en fonction des demandes et des besoins des usagers). Ces différents modes permettent d'adapter le service aux besoins des usagers. En ce qui concerne les modes d'exploitation souples, les demandes

de transport peuvent se faire de trois manières, la personne peut réserver sa course via le site internet de l'opérateur de transport, via une application mobile ou elle peut interpellier la navette autonome si celle-ci passe à proximité.

Les navettes autonomes permettent de mettre en place un service avec une amplitude de fonctionnement plus large du fait de l'absence de coûts liés à la masse salariale et au paiement des horaires de travail décalés, en-dehors du personnel présent dans les centres de contrôle et de supervision, du personnel de maintenance et des agents présents sur le réseau. Les heures de service peuvent être synchronisées sur les horaires de fonctionnement des lignes structurantes et le service peut être utilisable à tout moment pendant les heures d'ouverture du réseau. L'élargissement de l'amplitude de fonctionnement permet de répondre aux besoins des déplacements réalisés en-dehors des heures de pointe, tels que les déplacements domicile-travail des personnes qui travaillent sur des horaires décalés ou les déplacements de loisirs réalisés les week-ends ou en soirée.

L'utilisation des navettes autonomes dans les services de transport en commun permet d'avoir une plus grande souplesse au niveau de l'exploitation et de l'adaptation de l'offre à la demande. Comme le service ne nécessite pas la présence d'un conducteur, il est plus simple et plus rapide d'ajouter ou de retirer des véhicules du service commercial. Les véhicules sont suivis à partir d'un centre de contrôle et d'exploitation qui surveille le bon fonctionnement du service et peut vérifier le niveau de fréquentation. En cas de saturation du service, le centre de contrôle et d'exploitation peut ajouter des véhicules en ligne. A l'inverse, en cas de faible fréquentation et de suroffre, le centre de contrôle et d'exploitation peut retirer des véhicules du service commercial.

Enfin, les navettes autonomes peuvent fonctionner en convoi lorsque la fréquentation est plus importante sur un tronçon. Sur les parties les plus achalandées, les navettes autonomes sont alors liées les unes aux autres, par le biais d'attaches physiques qui se déploieraient automatiquement ou par le biais d'un signal qui permet aux navettes de communiquer entre elles. La navette située à l'avant est celle qui mène et dirige le convoi.

5.1.2 Un mode qui permet de limiter les coûts d'exploitation des transports en commun

Les navettes autonomes permettent de limiter les coûts d'exploitation, notamment les coûts liés à la masse salariale, et de mettre en place un service où l'offre est ajustée en fonction de la demande pour un investissement limité aux seuls besoins.

L'absence de conducteur limite les dépenses liées à la masse salariale. Le fonctionnement des services en navette autonome ne nécessitera, à terme, qu'une présence limitée de personnel, avec les opérateurs des centres de contrôle et d'exploitation, chargés de vérifier le bon fonctionnement du service et des navettes, les techniciens, chargés de la maintenance, et les agents présents sur le réseau, chargés d'assurer une présence humaine et de vérifier les titres de transport. Les automatismes de conduite peuvent être également utilisés pour les déplacements des véhicules dans les centres de remisage, ce qui permet de limiter les besoins de main d'œuvre pour le stationnement des bus, tramways et métro et de libérer le personnel pour la réalisation d'autres tâches.

Les navettes autonomes remplaceront des services assurés en minibus, ou qui pourraient être assurés en minibus, et qui sont plus onéreux que des services assurés avec des bus standards ou articulés. Cette différence de coût s'explique par le fait que les services assurés en minibus nécessitent un nombre plus important de conducteurs et de bus pour transporter un même nombre de personnes. Les coûts de transport pour chaque usager sont donc plus élevés pour un service assuré en minibus que sur des lignes exploitées avec des bus standards ou articulés.

L'utilisation de navettes autonomes offre une plus grande souplesse et une plus grande réactivité dans l'adaptation de l'offre aux besoins. Elles permettent aux collectivités et aux opérateurs de transport de financer une offre de transport qui est calibrée au plus près des besoins, sans phénomène de saturation ou de suroffre. Les véhicules sont suivis à partir d'un centre de contrôle et d'exploitation qui surveille le bon fonctionnement du service et peut vérifier le niveau de fréquentation. En cas de saturation du service, le centre de contrôle et d'exploitation peut ajouter des véhicules en ligne. A l'inverse, en cas de faible fréquentation et de suroffre, le centre de contrôle et d'exploitation peut retirer des véhicules du service commercial.

5.1.3 Un mode qui peut permettre de limiter la place de la voiture dans certaines situations en rendant les transports en commun plus attractifs

Les navettes autonomes pourraient permettre aux transports en commun de gagner des parts de marché. Elles seraient une solution pour compléter l'offre sur des territoires où les transports publics sont absents ou peu performants, tels que les zones périurbaines à faible densité, les zones d'hypercentre avec des rues étroites et les sites fermés.

Les services en navette autonome dans les zones périurbaines à faible densité sont une solution plus efficace que les lignes de transport en commun classiques. Les services actuels n'ont pas des

fréquences de passage assez resserrées, leur amplitude de fonctionnement n'est pas assez large et les systèmes de réservation, pour les services à la demande, sont trop rigides car ils nécessitent d'anticiper et d'organiser ses déplacements. A l'inverse, les services assurés par des navettes autonomes s'adaptent aux besoins, avec la possibilité d'ajuster, rapidement, l'offre en fonction de la demande, les véhicules sont disponibles sur des amplitudes de fonctionnement plus larges et les réservations, dans le cas d'un service à la demande, sont plus simples et peuvent être réalisées juste avant la course. La navette autonome permet d'assurer un service qui est disponible à tout moment, aux heures de pointe et aux heures creuses, ce qui permet de renforcer l'offre de transport en commun et de limiter l'utilisation de la voiture.

Au niveau des centres villes, les navettes autonomes complètent les déplacements réalisés à pied et à vélo et permettent une desserte des rues étroites grâce à leurs dimensions réduites et à leur faible emprise au sol. Ces services peuvent également assurer des dessertes en rabattement vers les lignes de transport en commun structurantes. Ils permettent de limiter l'utilisation de la voiture et leur mise en place peut s'accompagner d'un réaménagement des espaces publics pour favoriser les modes actifs. Dans ce cas, l'utilisation des navettes autonomes s'inscrit dans le cadre des politiques publiques de modération de l'utilisation de la voiture, de développement des transports en commun et d'amélioration du cadre de vie.

Au niveau des sites fermés, les navettes autonomes permettent d'assurer une desserte fine de ces espaces et de créer des liaisons entre les différents espaces du site, d'une part, et les arrêts de transport en commun et les aires de stationnement, d'autre part. Elles offrent une solution de transport performante, soit individuellement pour assurer les déplacements internes au site, soit individuellement, en période de faible affluence, ou en convoi, en période de forte affluence, pour assurer la desserte des arrêts de transport en commun et aires de stationnement jusqu'au site. La mise en place de services assurés en navette autonome permet de limiter l'usage de la voiture au sein du site fermé, tout en améliorant la desserte de celui-ci et en réduisant les nuisances.

Les navettes autonomes permettent donc d'assurer des services de transport en commun sur des espaces aujourd'hui peu ou pas desservis. Elles apportent des solutions de mobilité performantes, en termes de disponibilité des services, d'amplitude de fonctionnement et de flexibilité des modes d'exploitation, qui permettent de limiter l'utilisation de la voiture et d'offrir une alternative fiable en transport en commun.

5.2 Les difficultés à surmonter

Les navettes autonomes sont des outils de transport pertinents pour développer les liaisons de transport en commun sur les territoires, améliorer la performance des services et répondre aux différents besoins de mobilité des usagers. Cependant, ces technologies sont récentes et un certain nombre de difficultés restent à surmonter.

Les systèmes de pilotage autonome sont à perfectionner. L'adaptabilité des navettes autonomes aux modifications de la voirie et leur comportement face aux réactions des usagers de l'espace public doivent être améliorés.

Les coûts d'acquisition de ces véhicules sont élevés et le manque de recul ne permet pas d'avoir une vision précise des coûts de maintenance et d'exploitation.

La législation sur la circulation routière doit encore évoluer au niveau français, européen et international pour permettre la circulation de véhicules autonomes sur la voie publique et en cohabitation avec les autres usagers (piétons, cyclistes, automobilistes,...).

Les services assurés par les navettes autonomes peuvent, dans certaines situations, concurrencer les modes actifs ou les services de taxis.

Enfin, le développement des systèmes de conduite autonome nécessite l'acceptation du public, que ce soit des usagers ou des professionnels des réseaux de transport en commun.

5.2.1 Des technologies récentes en cours de perfectionnement

Les technologies qui équipent les navettes autonomes sont encore perfectibles. Les navettes autonomes ont parfois des difficultés à évaluer les dimensions et l'emplacement des objets dans l'espace, à s'adapter face aux comportements des autres usagers, et à circuler lorsque des modifications ont été réalisées sur la voirie. De plus, les conditions météorologiques dégradées, tels que la pluie et la neige, perturbent le fonctionnement des capteurs et la lecture de l'environnement par le véhicule.

La difficulté des navettes autonomes à évaluer les dimensions et l'emplacement des objets peut être illustrée par l'incident qui s'est produit à Sion, le 21 septembre 2016. Lors du passage de la navette autonome sur la place du Midi, cette dernière est entrée en collision avec le hayon ouvert d'un véhicule de livraison. Le hayon qui dépassait légèrement sur la trajectoire de la navette n'a pas été détecté par les capteurs LIDAR du véhicule autonome. L'incident s'est produit au niveau d'une légère courbe sur la trajectoire de la navette. Le véhicule autonome est passé sans difficulté à côté du premier hayon et c'est en tournant légèrement sur la gauche que la navette a heurté le coin arrière

droit du hayon. L'incident a provoqué quelques dégâts matériels sur la navette, la fenêtre du flanc gauche du véhicule a été endommagée.

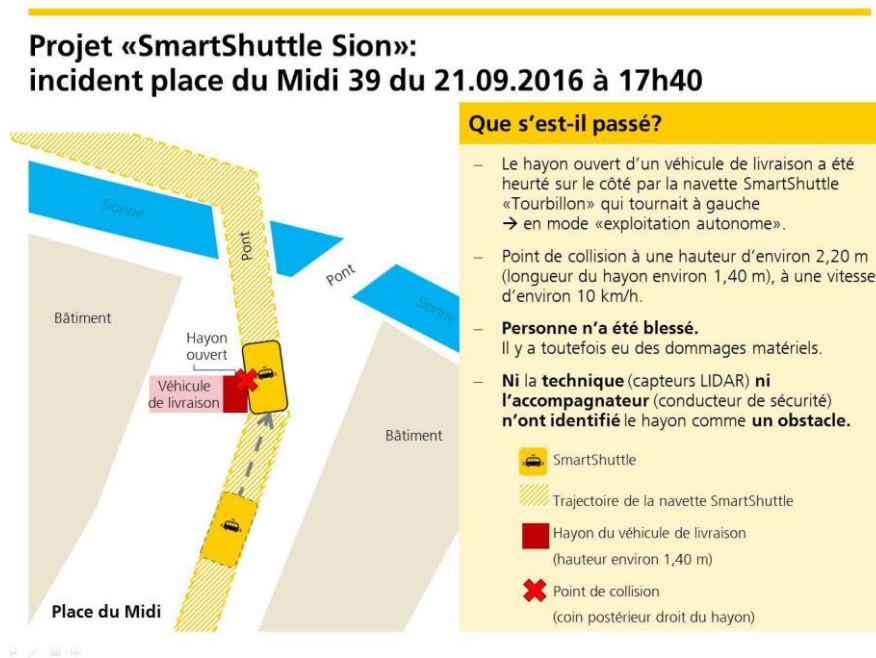


Figure 27 : Schéma de synthèse de l'incident du 21/09/2016 qui s'est produit sur la place du Midi à Sion. Source : CarPostal Suisse SA

Les capteurs des véhicules autonomes ont également des difficultés à fonctionner en cas de perturbations météorologiques. Les fortes chutes de pluie et les fortes chutes de neige parasitent les capteurs et détériorent la qualité des images reçues par le système de pilotage automatique. La neige et l'eau de pluie viennent se placer devant les capteurs, ce qui empêche les véhicules autonomes de recevoir l'information nécessaire pour se repérer dans l'espace et localiser les personnes et les objets. Le problème est similaire avec les déjections des volatiles et les objets qui viendraient se placer devant les capteurs. Il est donc nécessaire de mettre en place des solutions de nettoyage automatique de ces capteurs pour que les véhicules autonomes puissent circuler dans n'importe quelles conditions. Cependant, la neige et la pluie modifient également la réflectivité de la chaussée, ce qui perturbe l'empreinte digitale modélisée par le véhicule autonome. Dans ce cas, le véhicule doit utiliser ses lidars pour analyser son environnement en trois dimensions, plutôt que d'analyser le sol en deux dimensions. Les véhicules utilisent alors les objets et les bâtiments situés à proximité pour se repérer.

L'autre grande difficulté pour les véhicules autonomes est de prévoir et de s'adapter aux comportements des usagers présents dans leur environnement. Les impondérables sont très

nombreux et les trajectoires des piétons et des cyclistes sont très aléatoires. La navette autonome s'arrêtera régulièrement pendant son trajet, ce qui provoquera une augmentation du temps de parcours et une baisse de la vitesse préjudiciable pour la fiabilité et la performance du service. L'institut VEDECOM²⁰ travaille actuellement à l'amélioration et à la détection d'obstacles fixes ou mobiles. Il se base sur l'ensemble des capteurs, caméras, lasers et radars, pour récupérer une quantité plus importante de données et améliorer le traçage des objets et les calculs de probabilité. Ces recherches visent à améliorer les capacités d'adaptation des navettes autonomes à leur environnement et à permettre une circulation plus fluide et une meilleure exploitation.

Enfin, les navettes autonomes se déplacent grâce à une carte, réalisée en amont de la mise en exploitation des véhicules, et à une modélisation du territoire en deux et trois dimensions. Si des éléments de l'espace traversé par la navette autonome sont modifiés, changés de place ou enlevés, le véhicule peut avoir des difficultés à se repérer. Si les objets sont trop proches de sa trajectoire, elle peut s'arrêter et rester bloquée le temps que l'opérateur présent dans la navette ou au centre de contrôle et de supervision lui donne la consigne de repartir. Les systèmes de conduite autonome manquent donc encore de souplesse et de capacité d'adaptation. A Lyon, le changement de modèle des poubelles publiques a perturbé le fonctionnement des navettes autonomes qui ne reconnaissaient pas ce nouveau mobilier.

5.2.2 Des coûts d'acquisition élevés et des coûts de maintenance et d'exploitation qui restent à préciser

Les navettes autonomes sont des véhicules onéreux qui embarquent des technologies de pointe. Leur coût d'acquisition est important et les gains réalisés grâce à l'absence de conducteur et à la flexibilité des services restent à mesurer. De plus, pour faciliter la circulation de la navette autonome et son repérage dans l'espace urbain, il peut être nécessaire d'installer des capteurs au niveau des infrastructures et donc de réaliser des travaux sur la voirie.

Le prix moyen d'une navette autonome est élevé. Le prix du véhicule de la société Navya, la navette autonome Arma, s'élève à 160 000€, sans options. En comparaison, le prix d'un bus standard classique de douze mètres de long, de type Heuliez GX 327, s'élève à 250 000€ avec les options comprenant la climatisation et des pavillons vitrés supplémentaires. Un bus standard Heuliez GX 327

²⁰ L'institut VEDECOM est l'institut français de recherche partenariale publique-privée et de formation dédié à la mobilité individuelle décarbonée et durable. VEDECOM fait partie des Instituts pour la Transition Énergétique (ITE).

permet de transporter une centaine de passagers et une navette autonome Navya Arma permet de transporter jusqu'à quinze personnes. Le prix du véhicule ramené au nombre de places s'élève à 10 667€ pour la navette autonome Navya Arma et à 2 500€ pour le bus standard Heuliez GX 327. Cette comparaison permet de voir le coût de l'investissement pour le transport de chaque voyageur, dans le cas d'une utilisation maximale du matériel. Il est cependant possible, pour les collectivités publiques et les entreprises, de limiter les coûts d'acquisition en louant une navette autonome. La société Navya propose par-exemple une offre de location en partenariat avec l'entreprise NEO T Capital²¹. Cette offre propose aux collectivités publiques et aux entreprises de louer une navette Navya Arma pour 9 500€ par mois sur une période allant de 48 à 60 mois.

Néanmoins, au-delà des coûts d'acquisition ou de location, la mise en place de navettes autonomes pourrait permettre aux collectivités d'économiser sur les coûts d'exploitation grâce à l'absence de conducteur et à la flexibilité du service. L'entreprise Navya avance que le coût d'une ligne de transport équipée d'une flotte de véhicules autonomes est estimé de 30 à 40 % moins cher que le coût d'une ligne avec des véhicules de transport en commun conventionnels. Il est cependant nécessaire de comparer ces chiffres avec les données issues des expérimentations pour quantifier précisément les coûts d'exploitation des navettes autonomes et les économies réalisées.

Enfin, dans certaines situations, il peut être nécessaire d'installer des capteurs qui améliorent le fonctionnement des navettes autonomes. L'installation de ces capteurs dans les infrastructures permet aux navettes autonomes d'obtenir une information plus précise en ce qui concerne leur positionnement, leur perception de l'environnement et la localisation des objets et personnes. La communication entre l'infrastructure et le véhicule permet également de signaler à ce dernier toutes les modifications qui auraient pu être réalisées sur l'espace public. La navette autonome est alors informée et peut s'adapter plus facilement à la situation. Cependant, cette solution a un coût pour la collectivité car elle nécessite l'installation, la gestion et la maintenance d'un nombre important de capteurs. De plus, ce type de système est complexe, du fait de la présence de nombreux capteurs et des interactions entre les véhicules et les infrastructures, ce qui augmente la probabilité d'apparition de pannes.

Les coûts d'acquisition des navettes autonomes restent donc élevés, même si les évolutions technologiques et la démocratisation des capteurs permettront de faire baisser le coût de ces véhicules, et les coûts d'exploitation et de maintenance restent à préciser, même si l'absence de

²¹ *New Energy of Things Capital*, ou NEO T Capital, est une société internationale dédiée à l'investissement dans les domaines des énergies renouvelables et de la mobilité électrique.

conducteur et la plus grande flexibilité du système peuvent être sources d'économie. Enfin, le coût total de la mise en service de navettes autonomes dépend de la présence ou de l'absence de capteurs au niveau des infrastructures.

5.2.3 Une législation sur la circulation routière à faire évoluer

La législation sur la circulation routière est très stricte en ce qui concerne les véhicules autonomes. Le droit peut limiter la circulation des véhicules autonomes à des situations expérimentales, comme en France, et rendre obligatoire la présence d'un conducteur qui doit contrôler et pouvoir désactiver le véhicule autonome, comme le stipule la Convention de Vienne sur la Circulation Routière.

En France, la conduite autonome est seulement autorisée à des fins expérimentales depuis l'ordonnance du 3 août 2016. C'est à cette date que le Conseil des Ministres a donné son feu vert pour la circulation sur la voie publique de véhicules autonomes dans un cadre d'expérimentation.

Cette ordonnance stipule, dans son article n°1, que *« la circulation à des fins expérimentales d'un véhicule à délégation partielle ou totale de conduite sur une voie ouverte à la circulation publique est subordonnée à la délivrance d'une autorisation destinée à assurer la sécurité du déroulement de l'expérimentation »*. Elle précise également que *« l'autorisation est accordée par le ministre chargé des transports après avis du ministère de l'intérieur, s'il y a lieu après avis du gestionnaire de la voirie, de l'autorité compétente en matière de la police de la circulation et de l'autorité organisatrice des transports concernés »*.

Sur le plan international, la Convention de Vienne a été révisée le 23 mars 2016 au niveau du texte qui régle la circulation routière. Il précise que *« les systèmes de conduite automatisée seront explicitement autorisés sur les routes, à condition qu'ils soient conformes aux règlements des Nations Unies (ONU) sur les véhicules, ou qu'ils puissent être contrôlés voire désactivés par le conducteur »*.

Un certain nombre de spécialistes de la mobilité intelligente, dont Monsieur Joost Vantomme, le Responsable de la mobilité intelligente auprès de l'Association Européenne des Constructeurs d'Automobiles (ACEA), estiment que les règles de circulation des véhicules autonomes doivent être clarifiées. L'article n°8 de la Convention de Vienne sur la Circulation Routière amène des questionnements en ce qui concerne le conducteur et sa maîtrise du véhicule. Le terme conducteur est vague, il peut désigner un être humain ou un ordinateur, et l'expression *« maîtriser son véhicule »* reste à préciser. Par-exemple, les véhicules individuels actuels peuvent être équipés d'un système

d'assistance à la conduite qui, lorsqu'il est activé, délègue une partie des paramètres de la conduite à un ordinateur, ce qui pose la question de la maîtrise du véhicule par le conducteur. Les évolutions technologiques remettent donc l'article n°8 de la Convention de Vienne sur la Circulation Routière en question et impliquent une évolution de cette dernière.

Le développement des véhicules autonomes doit s'accompagner d'une modification de la législation routière, que ce soit au niveau français, européen ou international, pour que la circulation des véhicules autonomes soit permise sur la voie publique, sans opérateur à bord et en-dehors du cadre de l'expérimentation. L'évolution de la législation devrait se faire progressivement et coïncider avec les progrès techniques des systèmes de pilotage autonome.

5.2.4 Des services qui viennent, dans certaines situations, concurrencer les modes actifs ou les taxis

Les navettes autonomes représentent un moyen de transport performant qui peut concurrencer les modes actifs et les taxis sur les déplacements de courte distance. Les navettes autonomes offrent les avantages des modes actifs et des taxis, avec un service disponible à tout moment (dans la limite des horaires de fonctionnement du réseau) et une prestation qui s'adapte aux besoins, pour un coût moindre que le taxi et un confort supérieur à la marche ou au vélo.

Les navettes autonomes peuvent tout d'abord concurrencer les modes actifs, et notamment la marche et le vélo.

Elles répondent à des besoins de déplacement sur de petites distances comme ces deux moyens de transport.

Elles sont disponibles sur des plages horaires étendues, facilement réservables et peuvent fonctionner 24h sur 24 si le service est assuré par plusieurs navettes autonomes qui se relaient. Le service se rapprochera alors de la disponibilité des modes actifs.

Les services assurés par les navettes autonomes ont, également, un coût modéré (tarification du réseau) pour l'utilisateur et ils peuvent inciter les personnes à délaisser la marche ou le vélo pour leurs déplacements.

Les navettes autonomes, et les services qu'elles assurent, disposent donc des avantages de la marche et du vélo, sans les inconvénients liés aux intempéries, aux distances parcourues et à la fatigue.

La mise en place des navettes autonomes dans le domaine des transports collectifs peut créer un report modal des modes actifs vers les transports en commun, alors que les objectifs des politiques publiques visent à un report modal de la voiture vers les modes actifs et les transports en commun.

L'utilisation de navettes autonomes sur des aires piétonnes et des zones de circulation modérée, dans les centres villes et les espaces urbains denses, pose la question des usages de l'espace public et de l'utilisation de véhicules motorisés dans des espaces dédiés aux modes actifs. Les navettes autonomes sont des véhicules motorisés qui sont mis en place dans le cadre de politiques publiques qui visent à réduire la part modal de la voiture et à rendre les transports en commun plus attractifs. Pour favoriser le report modal vers les alternatives à la voiture et ne pas empiéter sur les espaces destinés aux modes actifs, les navettes autonomes devraient circuler sur les espaces dédiés aux voitures. Elles pourraient d'abord circuler sur des espaces où le trafic est modéré et restreint puis sur des espaces de circulation classique, une fois que les véhicules autonomes seront plus fiables et capables de rouler au milieu d'une circulation intense.

Les services assurés par des navettes autonomes peuvent également concurrencer les taxis. La souplesse dans les modes d'exploitation et l'adaptabilité de l'offre à la demande sont les deux qualités qui font des navettes autonomes un concurrent direct des services de taxi pour les déplacements de quelques kilomètres. Les navettes autonomes peuvent être réservées rapidement, par le biais de l'application mobile ou du site internet de l'opérateur de transport, à l'image des services de taxi qui peuvent se réserver quelques minutes avant la course. Elles sont disponibles sur des amplitudes de fonctionnement larges, ou 24h sur 24 pour les services de transport en commun en continu, tout comme les services de taxi. L'adaptabilité des navettes autonomes, lorsque celles-ci fonctionnent avec des modes d'exploitation souples, leur permet de répondre à des besoins de mobilité variés et d'assurer un service qui se rapproche du porte-à-porte, le service délivré par les taxis. Enfin, les services assurés par les navettes autonomes répondent à des besoins de déplacements similaires aux taxis pour une somme modique pour l'utilisateur qui paiera le prix d'un titre de transport en commun.

Conclusion

Les navettes autonomes sont des véhicules de transport en commun performants qui représentent une solution pertinente pour développer les réseaux de transport collectif et augmenter leur part modale, tout en réduisant l'utilisation des modes motorisés individuels.

Ce moyen de déplacement pourrait permettre de développer et d'étendre les réseaux de transport en commun sur des territoires sur lesquels ils ne sont pas présents ou bien sur des territoires sur lesquels ils sont peu compétitifs, tels que les zones urbaines denses avec des rues étroites, les sites privés ou publics fermés et les zones périurbaines peu denses (cf. Annexe n°4).

Enfin, les différentes modalités d'exploitation possibles permettent aux navettes autonomes de s'adapter aux spécificités de ces territoires et de répondre à des besoins de transport différents.

Cependant, le développement des navettes autonomes est récent et le manque de recul ne permet pas de présenter tous les apports et inconvénients de ces nouveaux modes de déplacement.

Ce manque de recul peut s'expliquer par le fait que les navettes autonomes sont des véhicules qui ont besoin d'être perfectionnés afin d'être déployés à plus grande échelle dans les réseaux de transport en commun. Aujourd'hui, les navettes autonomes circulent essentiellement dans le cadre d'expérimentations ou dans des circuits fermés, à l'image de la ville artificielle de la société Transpolis. Ces expérimentations et tests permettent d'améliorer les véhicules en les confrontant à une large palette de situation pour que les systèmes de pilotage autonome apprennent à réagir face à des situations différentes et à s'adapter aux modifications de l'espace et à cohabiter avec les autres usagers (piétons, cyclistes, automobilistes, ...).

De plus, la facilité d'utilisation et le faible coût des services assurés par les navettes autonomes posent la question des usages. Si l'utilisation n'est pas encadrée par des modes d'exploitation qui encouragent le partage des véhicules, le développement des navettes autonomes pourrait être synonyme de hausse des déplacements personnels et de la circulation motorisée.

Il est donc important de rappeler que les navettes autonomes sont un outil de mobilité qui doit s'inscrire dans une politique globale de mobilité qui vise à privilégier l'utilisation de modes de transport partagé. Pour que les navettes autonomes soient un outil au service du report modal vers les modes actifs et les transports publics, il faut qu'elles soient partagées entre les usagers et qu'elles soient complémentaires des services actuels de transport en commun. Laurent Kocher, directeur exécutif chargé du marketing, de l'innovation et des services chez l'exploitant de transport en commun Kéolis rappelait d'ailleurs, dans une tribune parue le 5 avril 2017 dans le journal Le Monde,

que « *la mobilité de demain se prépare dès maintenant par la promotion d'un modèle de mobilité hybride, combinaison de plus de modes lourds (train, métro, tramway, bus à haut niveau de service) et de flottes de véhicules partagés de petite taille (4 à 10 places) qui seront, un jour, autonomes.* »²².

L'enjeu pour les années à venir est donc de mettre en place des solutions de transport qui combinent un mode de propulsion électrique, afin de limiter l'empreinte des transports sur l'environnement, un système de conduite autonome, afin de limiter les coûts d'exploitation et de permettre une meilleure adaptation de l'offre aux besoins, ainsi qu'un fonctionnement partagé entre plusieurs utilisateurs, afin de limiter le nombre de véhicules motorisés et les nuisances (bruit, insécurité routière, occupation de l'espace, ...).

Les navettes autonomes peuvent être un mode de déplacement pertinent et durable, mais seulement à condition qu'elles soient électriques et partagées.

²² KOCHER, L. (2017). Les conditions d'une mobilité « smart ». Tribune dans le journal *Le Monde*

Table des figures

Figure 1 : Navette autonome Navya Arma à Lyon. Source : ITespresso.fr.....	1
Figure 2 : Une motrice MP 51 conservée au musée des transports urbains, interurbains et ruraux à Chelles (77). Ce musée est géré par l'Association du Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux (AMTUIR). Source : Wikipédia	6
Figure 3 : ARAMIS, un transport guidé et automatique équipé de petites cabines pneumatiques. Source : blog Social Media Sociology	7
Figure 4 : Première génération du VAL de Lille. Source : Flickr - Franky De Witte	9
Figure 5 : Présentation du fonctionnement des cantons mobiles déformables du système automatique de MAGGALY. Source : FerroLyon.....	10
Figure 6 : Un Cycab de l'INRIA et ses différents équipements. Source : INRIA	11
Figure 7 : Les différents modèles de véhicules autonomes développés par l'INRIA. Source : INRIA	12
Figure 8 : Un Cybus en test à La Rochelle en 2011. Source : Golem13	13
Figure 9 : Les différents niveaux d'automatisation définis par la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM) dans le cadre du volet <i>Véhicule autonome</i> du plan de <i>La Nouvelle France Industrielle</i> . Source : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL). Date : Septembre 2015.....	16
Figure 10 : Navette autonome Arma du constructeur Navya en circulation sur le quai Rambaud dans le quartier de La Confluence à Lyon. Source : Bruno Amsellem. Agence Divergence pour le journal <i>L'Obs</i>	18
Figure 11 : Schéma qui présente les trois grandes fonctions des véhicules autonomes avec les capteurs (la perception), l'intelligence artificielle (la planification) et les actionneurs (le contrôle). Source : Oliver Wyman, Daimler	19
Figure 12 : Fonctionnement des Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs (C-ITS). Source : INRIA	21

Figure 13 : Deux navettes EZ10 d'EasyMile se croisent sur le pont Charles De Gaulle à Paris. Source : RATP	23
Figure 14 : Une navette autonome Navya Arma en expérimentation à Sion, en Suisse. Source : navya.tech.....	24
Figure 15 : Une navette Olli de Local Motors. Source : aruco.com	25
Figure 16 : Services de navette autonome qui assurent la desserte d'une zone urbaine peu dense et rabattent sur une ligne structurante de transport en commun. Réalisation : Rodolphe Murat	27
Figure 17 : Services de navette autonome qui assurent en même temps les dessertes de proximité et les dessertes des tronçons structurants. Réalisation : Rodolphe Murat	31
Figure 18 : Services de navette autonome pour les espaces où les transports en commun sont absents ou peu attractifs. Réalisation : Rodolphe Murat	36
Figure 19 : Modes d'exploitation possibles avec les navettes autonomes pour assurer des services de transport à la demande. Réalisation : Rodolphe Murat	39
Figure 20 : Services de navette autonome pour les sites publics et privés fermés. Réalisation : Rodolphe Murat	42
Figure 21 : La future installation de la société Transpolis. Source : Transpolis.fr	48
Figure 22 : Une navette Navya Arma en circulation dans la ville témoin mCity de l'Université du Michigan. Source : navya.tech.....	52
Figure 23 : Plan du réseau TCL au niveau du sud de la Presqu'île et du pôle d'échanges de Perrache. La navette autonome est en correspondance avec le réseau TCL au niveau de la station <i>Hôtel de Région - Montrochet</i> du tramway T1. Source : TCL – Kéolis Lyon. Réalisation : Rodolphe Murat.	57
Figure 24 : Zoom sur le centre de Sion avec le périmètre de la vieille ville en orange. Les deux navettes autonomes Navya Arma desservent finement ce secteur et complètent le réseau urbain des Bus Sédunois. Source : CarPostal Suisse SA.....	61

Figure 25 : Carte de l'hypercentre de Sion avec en bleu, les aires piétonnes, en jaune, les zones de rencontre, en rose, les zones 30, et en blanc, les zones où il n'existe pas de limitation de vitesse. Source : Ville de Sion63

Figure 26 : Le cœur du réseau des transports en commun sédunois. La navette autonome fonctionne dans le secteur de la vieille ville et assure des correspondances avec le réseau des transports en commun aux arrêts Planta et Place du Midi. Source : CarPostal Suisse SA66

Figure 27 : Schéma de synthèse de l'incident du 21/09/2016 qui s'est produit sur la place du Midi à Sion. Source : CarPostal Suisse SA74

Figure 28 : Modalités d'exploitation conseillées en fonction des territoires. Réalisation : Rodolphe Murat99

Liste des acronymes

ACEA : Association Européenne des Constructeurs d'Automobiles

AMTUIR : Association du Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux (Chelles, France)

AOM : Autorités Organisatrices de Mobilité

ARAMIS : Agencement en Rames Automatisées de Modules Indépendants en Stations

BHNS : Bus à Haut Niveau de Service

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives

CEE ONU : Commission Economique pour l'Europe des Nations Unies

CEM : Compagnie Electro-Mécanique

CIMT : Compagnie Industrielle de Matériel de Transport

C-ITS : Systèmes de Transports Intelligents Coopératifs

DETEC : Département Fédéral de l'Environnement, des Transports, de l'Energie et de la Communication (Suisse)

DGITM : Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (France)

EPFL : Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

FP7 : 7ème programme-cadre de recherche et de développement (Union européenne)

IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux

INRETS : Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité

INRIA : Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

LIDAR : Light Detection And Ranging

LTE : Long Term Evolution (ou réseau mobile 4G)

LUTB *Transport and Mobility Systems* : pôle de compétitivité centré sur la performance des systèmes de transports collectifs de personnes et de marchandises dans les métropoles.

LUTS : Urban Transport Systems Laboratory (EPFL, Suisse)

MAGGALY : Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise

MEDDTL : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (France)

MIT : Massachusetts Institute of Technology

MP51 : Métro sur pneus 1951 (Paris)

MP55 : Métro sur pneus 1955 (Paris)

NO2 : Dioxyde d'azote

O3 : Ozone

OFROU : Office Fédéral des ROUTes

ONISR : Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière

PAMA : Plan d'Actions pour les Mobilités Actives

PCC : Poste de Commande Centralisé

PM10 : Particules en suspension de diamètre inférieur à 10 µm

PM2,5 : Particules en suspension de diamètre inférieur à 2,5 µm

PREDIT : Programme de REcherche et D'Innovation dans les Transports terrestres

RATP : Régie Autonome des Transports Parisiens

SO2 : Dioxyde de soufre

SYTRAL : Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise

TC : Transports en Commun

TCL : Transports en Commun Lyonnais

TTK : Transport Technologie – Consult Karlsruhe GmbH

UBR : Unités de Bord de Route

UEV : Unités Embarquées de Véhicules

UMTS : Universal Mobile Telecommunications System (ou réseau mobile 3G)

V2V : Communication entre les véhicules dans le cadre des systèmes de transports intelligents coopératifs (C-ITS)

V2X : Communication les véhicules et l'infrastructure dans le cadre des systèmes de transports intelligents coopératifs (C-ITS)

VAL : Villeneuve-d'Ascq – Lille puis Véhicule Automatique Léger

VEDECOM : Institut français de recherche partenariale publique-privée et de formation dédié à la mobilité individuelle décarbonée et durable

Wi-Fi : *"Wireless Fidelity"*

Bibliographie

Articles de périodique

- BEZIAT, E. (2017). Trois nouvelles navettes autonomes déployées sur l'esplanade de La Défense. *Le Monde*
- BULLIS, K. (2009), Personal Rapid Transit Startup. *MIT Technology Review*
- DARNAULT, M. (2016). Lyon lance une navette autonome à Confluence, « une première mondiale ». *Libération*
- DELETRAZ, F. (2017). Nouvelles mobilités : on a testé la navette autonome Navya. *Le Figaro*
- GACHE, P. (2014). Vision 2040 du véhicule autonome. *Millénaire 3*
- GUILLEMIN, C. (2016). Ville ouverte pour les navettes autonomes. *Transport Public* (n°1171)
- GRADT, J. (2014). Embouteillage en France : une facture estimée à 17 milliards d'euros par an. *Les Echos*
- HUBIN, F. (2017). La Défense : les navettes autonomes sans chauffeur, c'est parti. *Le Parisien*
- KOCHER, L. (2017). Les conditions d'une mobilité « smart ». Tribune dans le journal *Le Monde*
- MOULY, B. (2016). Voiture autonome : la route se dégage sous toutes les latitudes. *Les Echos*
- PARENT, M. (2011). Le rôle des petits véhicules automatiques dans la ville de demain. *Millénaire 3*
- PATIN, P. (1989), Y a-t-il un « créneau » pour les transporteurs hectométriques ? *Culture Technique* (n°19)
- PLAMONDON EMOND, E. (2016). Lyon expérimente une navette sans pilote. *Le Devoir*
- POINGT, M-H. (2016). La bataille du véhicule autonome. *Ville, Rail et Transports*
- POLERE, C. (2011). Robotique et mobilité. La perspective d'une cité des transports automatisés est-elle crédible ? *Millénaire 3*
- ROCHET, C. (2017). Navettes autonomes : quel bilan pour celles de Lyon ? *Le Figaro*
- ROUGEAU, F. (2016). La voiture peut-être plus que le véhicule de notre individualisme. *Les Echos*
- VIANNET, R. (2016). Lyon Confluence : transport intelligent pour ville intelligente. *Transport public*

Sites web

- *AVERE France*. Navya s'associe à NEoT Capital pour proposer une offre de location de ses navettes autonomes [en ligne] (article publié le 10 mai 2017)

http://www.avery-france.org/Site/Article/?article_id=6953

- BAUDRY, L. *TransportShaker*, le blog transport des consultants Wavestone. Navette Astucio, l'avenir des transports en commun [en ligne] (article publié le 16 janvier 2017)
<https://www.transportshaker-wavestone.com/navette-astucio-lavenir-des-transports-en-commun/>
- BROUET, A. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*. Les navettes autonomes circulent dans la vieille ville de Sion [en ligne] (article publié le 23 juin 2016)
<https://actu.epfl.ch/news/les-navettes-autonomes-circulent-dans-la-vieille-v/>
- CHAMPEAU, G. *Numerama*. Des bus électriques autonomes français testés en Suisse [en ligne] (article publié le 9 novembre 2015)
<http://www.numerama.com/tech/130187-des-bus-electriques-autonomes-francais-testes-en-suisse.html>
- *Confédération suisse*. Essais pilotes [en ligne]
<https://www.astra.admin.ch/astra/fr/home/themes/intelligente-mobilitaet/pilotversuche.html>
- *Ferro-Lyon*. Métro sur pneus – La ligne D – Signalisation et équipements [en ligne] (article publié le 23 novembre 2008 et mis à jour le 2 mai 2013)
<http://www.ferro-lyon.net/Metro-sur-pneus/ligne-D/signalisation-et-equipements-ligne-d>
- FONTAINE, E. *Les Numériques*. Cadre juridique adapté pour les véhicules autonomes [en ligne] (article publié le 4 août 2016)
<http://www.lesnumeriques.com/voiture/cadre-juridique-adapte-pour-vehicules-autonomes-n54543.html>
- FONTAINE, E. *Les Numériques*. Conduite autonome : la Convention de Vienne modifiée en ce sens [en ligne] (article publié le 24 mars 2016)
<http://www.lesnumeriques.com/voiture/conduite-autonome-convention-vienne-modifiee-en-sens-n50937.html>
- GUERNALEC, F. *Mobilicités*. Une navette autonome Navya pour 9.500 euros par mois [en ligne] (article publié le 24 mars 2016)
<http://www.mobilicites.com/011-6187-Une-navette-autonome-Navya-pour-9-500-euros-par-mois.html>
- HEUILLARD, R. *Clubic*. Une navette autonome se "faufile" entre les piétons en Suisse [en ligne] (article publié le 28 juin 2016)
<http://www.clubic.com/mag/transports/actualite-810576-navette-autonome-navya-sion-suisse.html>

- JUNG, M. *BFMBusiness*. La longue histoire de l'Inria et des voitures autonomes [en ligne] (article publié le 2 décembre 2014)
<http://bfmbusiness.bfmtv.com/01-business-forum/la-longue-histoire-de-linria-et-des-voitures-autonomes-634852.html>
- *Sion.ch*. Bus sédunois [en ligne]
<http://www.sion.ch/particuliers/mobilite/rail-transport-public/horaires-par-lignes.xhtml>
- *Trans'Bus*. Heuliez Access'Bus GX 327 [en ligne]
https://www.transbus.org/construc/heuliez_gx327.html
- *TransportUrbain*. Lille : premier métro automatique du monde [en ligne] (article publié en 2013)
<http://transporturbain.canalblog.com/pages/lille---premier-metro-automatique-du-monde/27162547.html>
- VARLET, T. *TransportShaker, le blog transport des consultants Wavestone*. Le bus autonome, la nouvelle alternative prometteuse de la mobilité urbaine [en ligne] (article publié le 18 novembre 2015)
<https://www.transportshaker-wavestone.com/bus-autonome-nouvelle-alternative-prometteuse-de-mobilite-urbaine/>

Entretiens réalisés pour le mémoire

- CEREMA Territoires et ville - Cécile Clément-Werny - Directrice d'études au service Déplacements Durables - Entretien réalisé le mercredi 12 juillet 2017.
- Kéolis Lyon - Aurélien Patry - Responsable aménagements de voirie – Entretien réalisé le vendredi 21 juillet 2017.
- Grand Lyon - Michèle Frichement - Chef de projet mobilité au Grand Lyon – Entretien réalisé le lundi 7 août 2017.

Ouvrage collectif

- ASCONCHILO, N., BOYON, L., COUPE, C., DEJODE, M., DELACHE, X., DINH, T., GOGNEAU, A., JOURDREN, G., PIERQUET, N., RASSON, F., SOLINHAC, M., WONG, F. (2015). Véhicule à délégation de conduite et politiques de transports. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM). Service de l'administration générale et de la stratégie. Sous-direction des études et de la prospective.

Annexe

Annexe n°1 : compte-rendu d'entretien - CEREMA - 12 juillet 2017

Entretien réalisé le mercredi 12 juillet 2017, au CEREMA Territoires et ville, avec Cécile Clément-Werny, Directrice d'études au service Déplacements Durables.

Les premiers services de véhicules autonomes se développent dans les zones denses là où la demande est la plus forte et le modèle économique le plus rentable. La navette autonome est un outil de déplacement qui doit être utilisé de façon partagée et s'inscrire dans le cadre des politiques publiques de mobilité durable

Performance des véhicules autonomes au niveau économique et environnemental

Les véhicules autonomes ne seront performants économiquement et environnementalement que s'ils sont partagés.

D'un point de vue économique, un véhicule partagé peut servir à plusieurs personnes dans la journée. Une fois qu'une course est terminée, le véhicule peut prendre une autre personne. De plus, si plusieurs personnes se déplacent sur un même itinéraire, il suffit d'un seul véhicule pour répondre à ces différents besoins de déplacement.

D'un point de vue environnemental, un service partagé permet de limiter le nombre de véhicules autonomes en circulation et les besoins en stationnement. Les espaces de stationnement sont réduits, ce qui représente un gain de place pour les modes actifs.

A l'avenir, si tous les véhicules sont autonomes et connectés, il serait également possible de gagner de la place en diminuant la largeur des voies. Les véhicules suivraient un itinéraire précis et il n'y aurait plus besoin de surlargeurs pour le croisement des véhicules.

Les navettes autonomes et l'organisation des réseaux de transport en commun

La mise en place de navettes autonomes pourrait pousser à la disparition de certaines lignes régulières au profit de services à la demande car si ces véhicules sont connectés, ils pourraient s'adapter aux demandes des passagers et faire des détours.

La suppression des lignes régulières serait plus rentable économiquement en zone dense là où les flux sont les plus importants, ce qui pose la question de l'utilisation de ces navettes autonomes dans

les zones peu denses et du développement de services personnalisés dans les zones denses alors que les politiques publiques promeuvent les modes actifs et les transports en commun.

Enfin, sur les zones où fonctionnent des services de Transport A la Demande (TAD) parfois rigides, avec la nécessité de réserver à l'avance, la mise en place de navettes autonomes pourrait amener des flux supplémentaires vers les transports en commun.

Le développement des véhicules autonomes permet d'avoir une plus grande flexibilité et une plus grande modularité dans l'offre de transport en commun

Les navettes autonomes sont des véhicules flexibles qui s'adaptent au contexte de desserte et aux besoins de mobilité.

Il peut être intéressant de mettre en place un système de platooning, à l'image du système de Lohr Industrie qui se nomme Cristal, pour la desserte des tronçons où la charge est la plus forte. Le platooning correspond au fonctionnement en convoi des navettes autonomes. Dans ce mode d'exploitation, une navette autonome dessert seule une zone périurbaine puis elle rejoint, sur un tronçon de son trajet, plusieurs autres navettes autonomes. Les navettes autonomes forment alors un convoi pour desservir le tronçon le plus fréquenté. Ce système permet d'éviter la rupture de charge entre les services de proximité et les services structurants.

La navette autonome, un véhicule d'une dizaine de place qui se rapproche du transport à la demande et de l'autopartage

Les navettes autonomes sont des véhicules de petite taille, proches des voitures autonomes, qui peuvent accueillir jusqu'à quinze personnes. Elles sont aujourd'hui présentes dans le domaine des transports en commun mais elles pourraient également assurer des services de transport à la demande et des services de mobilité personnalisés. A l'inverse, les voitures autonomes qui assurent des trajets personnalisés pourraient être également partagées.

Ces caractéristiques proches entre navettes autonomes et voitures autonomes posent la question de la concurrence entre ces deux modes de transport qui pourraient répondre à des besoins de mobilité similaires.

En ce qui concerne l'utilisation des navettes autonomes, il peut être imaginé qu'elles assurent un service public sur une amplitude horaire précise et qu'elles assurent un service privé le reste du temps.

La nécessité d'installer des capteurs dans l'espace public pour la circulation des véhicules autonomes

La mobilité autonome est d'autant plus pertinente lorsqu'elle est connectée aux infrastructures. Les véhicules autonomes fonctionnent mieux quand ils sont connectés et qu'il existe un transfert d'informations.

Cependant, la connexion des véhicules nécessite l'installation de capteurs dans les espaces publics, ce qui peut représenter un coût important pour la société.

La présence humaine dans les réseaux est questionnée par le développement des véhicules

Les navettes autonomes posent la question de la présence humaine sur les réseaux de transport en commun.

Le développement des automatismes montre que les conducteurs ne sont pas seulement présents pour conduire un véhicule mais qu'ils assurent aussi une présence. Ils rassurent les passagers et sont disponibles pour répondre à leurs questions. On peut donc penser que le développement des automatismes amènera à repenser la présence humaine sur le réseau et à faire évoluer le rôle et les missions des conducteurs.

Annexe n°2 : compte-rendu d'entretien - Kéolis Lyon - 21 juillet 2017

Entretien réalisé le vendredi 21 juillet 2017, au siège de Kéolis Lyon, avec Aurélien Patry, Responsable au service aménagements de voirie.

La Direction Voirie est chargée de l'aménagement de la voirie et de la bonne insertion des transports en commun dans les espaces urbains. Elle travaille sur les phases de conception des projets de voirie et de pôle d'échanges multimodaux en lien avec les projets de transport en commun.

Présentation de l'expérimentation lyonnaise

Navly, une société pour gérer l'expérimentation

L'expérimentation lyonnaise est assurée par la société Navly qui est détenue par l'exploitant de transport en commun Kéolis, à hauteur de 50%, et par le constructeur de navettes autonomes Navya, à hauteur de 50%.

Un service sur la journée

Le service fonctionne de 10h jusqu'à 18h ou 19h, selon l'autonomie des batteries. Les départs se font toutes les 30 minutes des deux terminus et les navettes autonomes parcourent la ligne en quinze minutes.

Deux navettes autonomes Navya Arma

Le service est assuré avec deux navettes autonomes à propulsion électrique Arma du constructeur Navya. Les véhicules sont remisés dans des containers qui ne sont pas isolés, ni réfrigérés ou chauffés, ce qui pose des problèmes au niveau des batteries des véhicules. Le rechargement des véhicules est assuré via des prises présentes dans ces containers. L'entretien des véhicules est effectué sur place, près du container. Le gros entretien se fait, quant à lui, en atelier.

Les deux navettes sont totalement autonomes. Un opérateur est présent à bord pour vérifier le bon déroulement de l'exploitation, informer les usagers, activer le départ du service et sélectionner les arrêts à desservir pendant le trajet.

Une circulation sur des aires piétonnes

Les deux navettes sont en service sur des aires piétonnes où la circulation des véhicules motorisés est autorisée, sous conditions, pour les véhicules de secours, de livraison, des services publics et des riverains.

Quelques aménagements mineurs pour assurer le bon fonctionnement du service

Cette expérimentation a nécessité la reprise de l'enrobé au sol sur quelques points sensibles, pour éviter la formation d'ornières et de nids de poule, la création de deux quais, pour permettre l'accessibilité des personnes à mobilité réduite, la pose de totems, pour signaler l'emplacement des stations, et le déplacement du mobilier urbain se trouvant sur la trajectoire de la navette autonome.

Un marquage au sol, sous la forme d'un logo bleu représentant un bus, a été installé par la Métropole de Lyon (Grand Lyon) pour signaler la trajectoire de la navette autonome.

La place des navettes autonomes sur l'espace public

La mise en place de navettes autonomes sur des aires piétonnes pose la question de la place de ces véhicules. En tant que mode de déplacement motorisé, les navettes autonomes ne devraient-elles pas plutôt circuler sur les espaces de circulation automobile ?

L'utilisation de navettes autonomes sur les aires piétonnes peut être contraire aux objectifs des politiques publiques qui visent à rééquilibrer la place de chaque mode et à donner plus de place aux modes actifs.

Les questions de remisage et d'entretien

Les services de transport en commun assurés par des navettes autonomes doivent disposer d'un lieu de remisage et d'entretien qui soit situé à proximité pour limiter les trajets en haut-le-pied.

Le remisage des véhicules doit être effectué dans des espaces où les températures sont tempérées pour éviter que le matériel et les batteries ne soient détériorés par des écarts de température trop importants. Les parkings souterrains, les parkings d'immeuble et les rez-de-chaussée peuvent apparaître comme des lieux de remisage intéressants où les conditions climatiques sont tempérées.

La réglementation

Il est possible de demander une autorisation pour faire circuler des véhicules autonomes dans un cadre d'expérimentation. Les demandes sont étudiées par le ministère et les autorisations sont délivrées au cas par cas. A noter que les demandes d'autorisation ne sont obligatoires que pour les espaces à domanialité publique.

Chaque expérimentation possède des caractéristiques propres qui sont définies par la réglementation en fonction des demandes des organismes qui souhaitent expérimenter des navettes autonomes.

A terme, les textes législatifs évolueront vers des autorisations d'exploitation sur voies partagées.

Les incidences des navettes autonomes sur les réseaux de transport en commun

Les navettes autonomes n'ont pas pour vocation de remplacer les lignes régulières de transport en commun, elles s'inscrivent comme un service complémentaire.

Ces services complémentaires doivent être intégrés au réseau de transport en commun, que ce soit au niveau de l'information destinée aux voyageurs, de la signalétique, de la billettique, de la charte graphique et de la tarification, et articulés avec les autres services. Pour optimiser les correspondances, celles-ci doivent se faire de quai à quai.

La présence humaine dans les réseaux est questionnée par le développement des véhicules

La présence humaine est questionnée par le développement des automatismes dans le domaine des transports en commun.

Les missions du personnel seront redéfinies et de nouveaux métiers seront créés. Les exploitants de transport en commun embaucheront des opérateurs de proximité qui géreront des flottes de navettes et des superviseurs qui assureront un suivi du service depuis un centre de contrôle.

Enfin, il faut noter que l'automatisation des services de transport en commun sera progressive et que les services autonomes cohabiteront avec des services exploités en mode manuel. Chaque type de service possède une zone de pertinence propre.

Annexe n°3 : compte-rendu d'entretien - Métropole de Lyon (Grand Lyon) - 7 août 2017

Entretien réalisé le lundi 7 août 2017, à la Métropole de Lyon (Grand Lyon), avec Michèle Frichement, Chef de projet mobilité.

Des véhicules en développement

Les véhicules autonomes sont des véhicules en cours de développement qui ont parfois des difficultés à circuler au milieu d'un environnement qui évolue en permanence.

Ce sont des véhicules qui n'arrivent pas toujours à s'adapter aux modifications de l'infrastructure ou au comportement des piétons et des cyclistes qui sont parfois imprévisibles. De plus, un véhicule autonome peut ne pas détecter certains objets ou ne pas bien en mesurer les dimensions.

Le développement des véhicules autonomes nécessite donc d'adapter les infrastructures pour que ceux-ci puissent circuler. Les défaillances des véhicules autonomes posent également la question de la mise en place de capteurs au niveau des infrastructures pour en améliorer le fonctionnement.

Enfin, les navettes autonomes embarquent une technologie de pointe qui est complexe et qui est encore faillible.

La législation routière

La Convention de Vienne sur la Circulation Routière interdit la circulation des véhicules autonomes en-dehors des cas d'expérimentation. Le développement des véhicules autonomes nécessitera donc une évolution de la législation.

Les zones de pertinence des véhicules autonomes

Les véhicules autonomes peuvent représenter une solution de transport partagée pertinente pour les zones où il n'y a pas une trop forte densité d'usage, tels que les zones industrielles.

Ils peuvent être utilisés comme des modes de transport en commun longue distance avec une exploitation mixte, en mode autonome sur autoroute ou sur voie guidée et en mode manuel sur les routes classiques et les voiries urbaines.

Du point de vue des déplacements au sein des centres de remisage des transports en commun, la conduite autonome pourrait permettre d'optimiser le stationnement des véhicules dans les dépôts. Grâce aux automatismes de transport, les véhicules seraient stationnés plus près les uns des autres, ce qui permettrait de gagner de l'espace dans les dépôts.

Enfin, à moyen et long terme, les véhicules autonomes de petite taille pourraient être utilisés pour assurer des services d'autopartage et le développement des automatismes de conduite offrirait une circulation plus fluide sur les axes routiers.

La présence humaine

Le développement des véhicules autonomes dans le domaine des transports en commun met en valeur l'importance de la présence humaine au sein des réseaux.

La présence d'agents sur le réseau est importante pour rassurer les usagers, répondre à leurs questions, assurer la maintenance, ou encore intervenir en cas de panne ou d'incident.

L'expérimentation lyonnaise

Le service assuré par les navettes autonomes Navya Arma à Lyon est très emprunté par les touristes et assez peu par les actifs du quartier. Les navettes autonomes sont trop lentes et leur fréquence de passage n'est pas assez importante, ce qui rend ce service peu pertinent pour les salariés des entreprises situées le long du quai Rambaud, en bord de Saône.

Annexe n°4 : les modalités d'exploitation des services assurés par des navettes autonomes en fonction des territoires desservis

Les navettes autonomes représentent un moyen de déplacement qui pourrait permettre de développer et d'étendre les réseaux de transport en commun sur des territoires sur lesquels ils ne sont pas présents ou sur des territoires sur lesquels ils sont peu compétitifs, tels que les zones urbaines denses avec des rues étroites, les sites privés ou publics fermés et les zones périurbaines peu denses. Les différentes modalités d'exploitation possibles permettent aux navettes autonomes de s'adapter aux spécificités de ces territoires et de répondre à des besoins de transport différents.

		Modalités d'exploitation				
		Itinéraire fixe et arrêts fixes avec desserte systématique	Itinéraire fixe et arrêts fixes desservis à la demande	Itinéraire fixe et arrêts souples	Itinéraires souples et des arrêts fixes desservis à la demande	Itinéraires souples et arrêts souples
Territoires	Centre-ville ou zone urbaine dense	✘	✔	✔	✘	✘
	Site public ou privé - Desserte interne	✘	✘	✔	✔	✔
	Site public ou privé - Desserte entre l'extérieur et l'intérieur	✘	✔	✔	✔	✘
	Autour d'une gare ou d'un arrêt de TC dans une zone peu dense	✘	✘	✘	✔	✔
	Zone (péri)urbaine peu dense	✘	✘	✘	✔	✔
		✘	✘	✘	✔	✔

Figure 28 : Modalités d'exploitation conseillées en fonction des territoires. Réalisation : Rodolphe Murat

Les services assurés par les navettes autonomes dans les espaces urbains denses nécessitent une exploitation plus rigide avec des itinéraires fixes, pour que le trajet de la ligne soit repérable, et des arrêts fixes à la demande, où la navette s'arrêtera aux arrêts lorsqu'un usager souhaite monter ou descendre, ou des arrêts souples, où la navette s'arrêtera selon les demandes des usagers qui choisiront les lieux de montée et de descente.

La desserte des sites privés et publics fermés est, quant à elle, divisée en deux types de liaisons.

La première catégorie de liaisons concerne la desserte interne du site. Ces dessertes demandent une certaine souplesse dans l'exploitation afin de répondre à des besoins de mobilité variés. Il est alors nécessaire de mettre en place des itinéraires souples avec des arrêts fixes à la demande, où la navette ne s'arrêtera que si des personnes souhaitent monter ou descendre, ou des arrêts souples, où les usagers choisissent les lieux d'arrêt de la navette. Dans le cas où le propriétaire du site souhaite organiser les déplacements au sein de ces installations, il peut opter pour un itinéraire fixe avec des arrêts souples qui s'adapteront aux demandes des usagers.

La deuxième catégorie de liaisons concerne la desserte entre l'extérieur et l'intérieur du site, et l'inverse. Ces dessertes nécessitent de cumuler des modes d'exploitation rigides, pour les tronçons les plus fréquentés, et souples, pour les tronçons internes au site. Les navettes autonomes peuvent circuler en convoi sur les parties en tronc commun où les besoins de mobilité sont plus importants. Elles suivront un itinéraire fixe avec des arrêts fixes à la demande, où les navettes ne s'arrêteront que si des personnes souhaitent monter ou descendre. Sur les tronçons internes au site où la demande est moins forte, une exploitation plus souple peut être mise en place. Les navettes autonomes se séparent et desservent le site individuellement pour desservir les lieux de destination choisis par les usagers. Ces dessertes nécessitent des itinéraires fixes et des arrêts souples, où la navette s'arrêtera selon les demandes des usagers qui choisiront les lieux de montée et de descente, ou des itinéraires souples et des arrêts fixes à la demande, où la navette s'arrêtera aux arrêts lorsqu'un usager souhaite monter ou descendre. Dans le sens inverse, les navettes autonomes adopteront un mode d'exploitation souple pour récupérer les différents usagers puis circuleront en convoi avec un mode d'exploitation plus rigide sur les parties en tronc commun.

Enfin, pour les dessertes en zone peu dense, que ce soit pour une liaison vers une ligne de transport en commun structurante (transports en commun urbains, départementaux ou régionaux) ou une desserte interne de la zone, il est nécessaire d'adopter des modes d'exploitation plus souples qui permettent de répondre à l'éparpillement des flux propres aux zones peu denses.