

Rapport final

Une navette automatisée pour réaliser les transports de demain



Source : TPF | Jo Bersier

Projet Marly 2.0

Version définitive

Avril 2022

Transports publics fribourgeois



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

1. Tables des matières

1. TABLES DES MATIERES.....	2
2. INTRODUCTION	3
2.1. Contexte et historique du projet.....	3
2.2. Objectifs du projet Marly 2.0.....	4
3. ORGANISATION ET SUIVI	4
4. BILAN DÉTAILLÉ DU 01.10.2021 AU 10.12.2021.....	6
5. RESULTATS FINAUX D'EXPERIENCES.....	9
5.1. Rappel : Parcours et horaires	9
5.2. Rappel : Descriptions des navettes	10
5.3. Aspects techniques	11
5.4. Exploitation.....	15
5.5. Données statistiques	16
5.6. Analyse de l'amélioration de la cadence.....	23
5.7. Projet Téléopération	28
5.7.1. Activités par Workpackages	29
5.7.2. Point de vue des TPF sur la téléopération	40
5.8. Comparaisons entre le monde autonome routier et ferroviaire	41
5.8.1. Etat de l'art des trains autonomes	41
5.8.2. Opportunités et risques des trains autonomes.....	43
5.8.3. Comparaisons technologiques.....	44
5.8.4. Comparaisons sur l'acceptance sociale.....	45
5.8.5. Comparaisons réglementations	46
5.8.6. Interaction des deux systèmes dans le contexte des TPF	47
6. CONCLUSION.....	48
6.1. Appréciation générale.....	48
6.2. Perspectives.....	49
7. TABLE DES FIGURES.....	50

2. Introduction

Consécutivement à la fin du projet 1 du test de deux navettes automatisées sur la ligne 100 à Marly, les TPF ont émis la volonté de réaliser un nouveau projet d'expérimentation d'environ deux ans pour approfondir les connaissances et les recherches liées aux navettes automatisées. En effet, l'exploitation a pu être stabilisée et des opportunités intéressantes de collaboration avec la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR) se sont présentées. La première partie de ce rapport rappelle les informations générales concernant le projet Marly 2.0 notamment le contexte, les objectifs et l'organisation mise en place. Ensuite, un bilan détaillé des deux derniers mois a été réalisé en complément des bilans intermédiaires effectués chaque 6 mois avant une présentation des résultats globaux du projet Marly 2.0. Des réflexions sur l'augmentation de la vitesse ainsi que sur la téléopération réalisées par la HEIA-FR sont décrites avant la présentation d'une comparaison réalisée par les TPF entre le monde autonome routier et ferroviaire.

2.1. Contexte et historique du projet

Pour rappel, ce rapport fait le bilan du projet Marly 2.0 de la Ligne 100 exploitée avec des navettes automatisées à Marly qui s'est déroulée d'avril 2020 à décembre 2021. Ce second projet entre dans la continuité d'un premier projet réalisé entre septembre 2017 et mars 2020. La création de la ligne 100 est le fruit d'un partenariat public-privé entre les commanditaires de l'offre de transport public, le Marly Innovation Center (MIC) et les TPF permettant de répondre à la problématique de desserte du site tout en testant une nouvelle technologie. Les Transports publics fribourgeois souhaitent tester une technologie permettant de répondre à la problématique de desserte du dernier kilomètre. Le site du Marly Innovation Centre à Marly alors en pleine expansion était idéal pour mener une telle expérimentation avec des véhicules automatisés. La capacité de transport des navettes était parfaitement adaptée au potentiel de clients entre 2017 et 2021. Le MIC est un ancien site industriel racheté après sa faillite en 2013 par une société privée. Son plan de développement est ambitieux avec la construction d'immeubles résidentiels ainsi que de bâtiments à vocations artisanales et industrielles. En 2022, les habitants des premiers 350 logements pourront emménager. A terme, ce sont plus de 2'500 habitants et employés qui se côtoieront sur le site.



Figure 1 - Marly Innovation Center en 2021 (Source : MIC)

Le premier projet a atteint ses objectifs en permettant aux TPF de mettre en service deux navettes Navya en septembre 2017 après une phase de tests préliminaires durant l'été de la même année. Les TPF ont suivi le processus pour obtenir les autorisations auprès de la Confédération avant de pouvoir cartographier le site avec Navya. Les premiers mois ont permis de découvrir les véhicules et leurs réactions ainsi que leurs limites d'utilisation permettant ainsi aux grooms d'acquérir de précieuses connaissances sur la sensibilité des capteurs. Après une première période de réglages, l'exploitation de la ligne 100 a été stabilisée et l'état réel de la technologie découverte. Les TPF ont récolté de nombreuses données provenant directement des véhicules mais également via des sondages réalisés auprès des utilisateurs et des employés du MIC. La collaboration avec la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR) s'est poursuivie dans ce second projet avec un focus sur le thème de la téléopération. Après la fin de l'autorisation du projet 1, les TPF ont demandé une deuxième autorisation afin d'effectuer des tests dans le cadre du projet Marly 2.0 jusqu'en décembre 2021, date qui marque l'arrivée des premiers habitants sur site et la mise en service du prolongement d'une ligne de bus conventionnelle afin d'avoir une capacité suffisante pour absorber l'arrivée des premiers habitants sur site.

2.2. Objectifs du projet Marly 2.0

Les objectifs du projet Marly 2.0 sont variés et peuvent être résumés de la manière suivante :

- Amélioration de la cadence
- Téléopération
- Comparaisons entre les navettes autonomes et les trains autonomes

À la suite des nombreux travaux sur site et selon les explications données dans les chapitres suivants, une amélioration de la cadence n'a malheureusement pas pu être réalisée comme initialement planifiée. Cependant, une simulation théorique a été réalisée. La téléopération et une comparaison entre les mondes autonomes routiers et ferroviaires sont également présentés dans le présent rapport.

3. Organisation et suivi

Pour rappel, les partenaires du projet sont les suivants :



L'Agglo de Fribourg soutient le projet en finançant une partie conséquente des coûts d'exploitation de la ligne 100.



L'Etat de Fribourg est impliqué via son service de la mobilité. Le Conseil d'Etat a permis la réalisation de l'essai grâce à sa participation au financement de l'un des deux véhicules et à une partie des coûts d'exploitation.



Le Marly Innovation Center a accueilli cette expérimentation et apporté son soutien en finançant l'investissement d'un véhicule et en mettant à disposition les locaux destinés aux grooms et au garage des navettes.



Finalement, la Commune de Marly a collaboré en autorisant la circulation des navettes sur son territoire et en faisant quelques aménagements sur la signalisation et le marquage des routes. La Commune s'occupe également d'une partie de l'entretien du parcours.

Tous les partenaires font parties intégrantes du Comité de pilotage du projet chargé des décisions stratégiques.

Des partenaires institutionnels ont également permis de mettre en œuvre ce projet. Il s'agit de l'OCN (Office de la circulation et navigation du canton de Fribourg), de l'Office fédéral des routes (OFROU), de l'Office fédéral des transports (OFT) et de l'Office fédéral de la communication (OFCOM) pour la délivrance des autorisations.

Les TPF ont également collaboré avec l'entreprise Bestmile pour les développements d'applications mobiles pour les grooms et les clients. Initialement, il était également prévu que Bestmile rende possible une communication entre les navettes et les bus de la ligne 1 pour assurer les correspondances. Le déploiement du temps réel au sein des TPF a subi de nombreux retards. Malheureusement, la mise en faillite de Bestmile a été prononcée avant la fin du projet Marly 2.0. Seuls les développements effectivement effectués ont été payés n'engendrant pas de pertes financières pour les partenaires du projet.

Le projet de la ligne 100 a permis de créer une belle collaboration avec la HEIA-FR. En effet, ses collaborateurs ont effectué diverses études notamment en lien avec la cybersécurité des navettes dans le premier projet. Ces études ont permis de développer des recherches autour du thème de la téléopération pour le présent projet. La HEIA-FR est ainsi parvenue à créer un concept permettant de téléopérer différents types de plateformes et petits véhicules. Cette expérience leur a permis d'acquérir de nombreuses connaissances qui contribuent à développer de nouveaux projets de recherches passionnants.

Concernant l'organisation interne, elle est restée identique au premier projet. La conduite générale du projet incombe au service Projets et innovation du Département Planification des TPF. Il interagit avec tous les partenaires, organise les comités de pilotage, gère l'administratif, le budget et effectue les rapports de suivi. Le Département Exploitation Route s'occupe de la gestion du personnel et de l'attribution des tours de services aux grooms. Le centre d'exploitation surveille les navettes à distance et sur demande des grooms déclenche une intervention à l'atelier pour des dépannages comme une crevaison. Le Département Technique s'occupe des petites réparations et organise les rapatriements des véhicules à Givisiez si besoin. Il gère également les expertises techniques annuelles. Les grooms et Navya gèrent ensemble la résolution des problèmes opérationnels. La conduite du projet est informée et aide, si besoin, à leur résolution. La conduite de projet fait le lien avec le MIC si une intervention est nécessaire de leur part, par exemple pour l'entretien de la végétation.

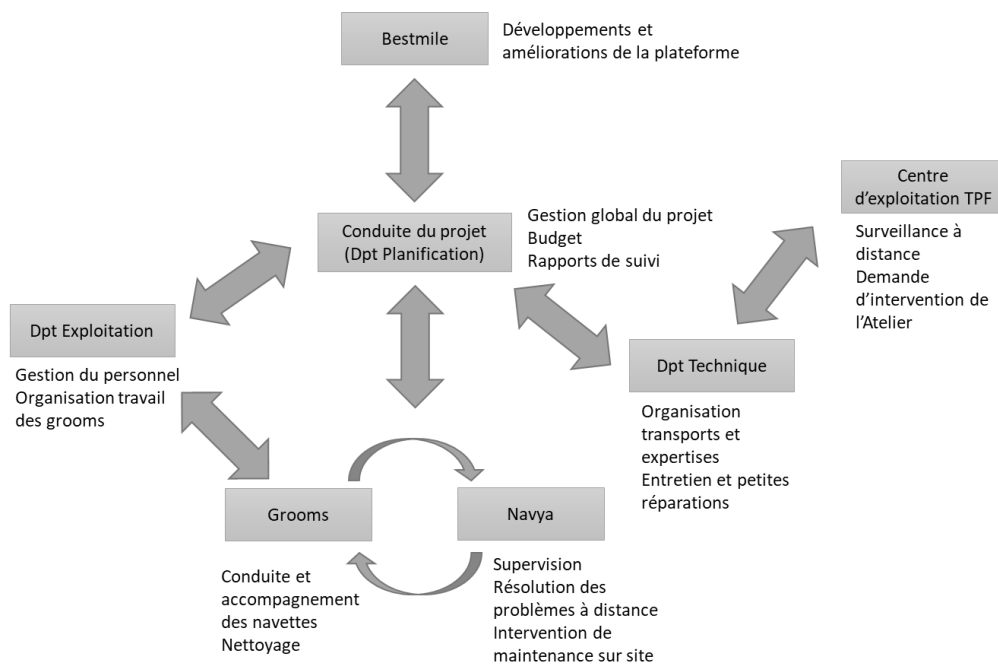


Figure 2 - Organisation interne (Source : TPF)

Concernant le suivi du projet, le secrétaire général du DETEC autorise l’essai et demande aux TPF de rendre un rapport d’expérience tous les six mois. Ces rapports sont publics et peuvent être consultés sur leur site Internet. Les données sont récoltées via la plateforme de Bestmile (vitesses moyennes, pourcentage de circulation en mode automatique et manuel par exemple) et via des fiches de comptages remplies par les grooms (kilomètres journaliers et passagers transportés) permettant ainsi un double contrôle. Les principales étapes du projet sont résumées ci-dessous pour une meilleure compréhension des résultats des prochains chapitres.

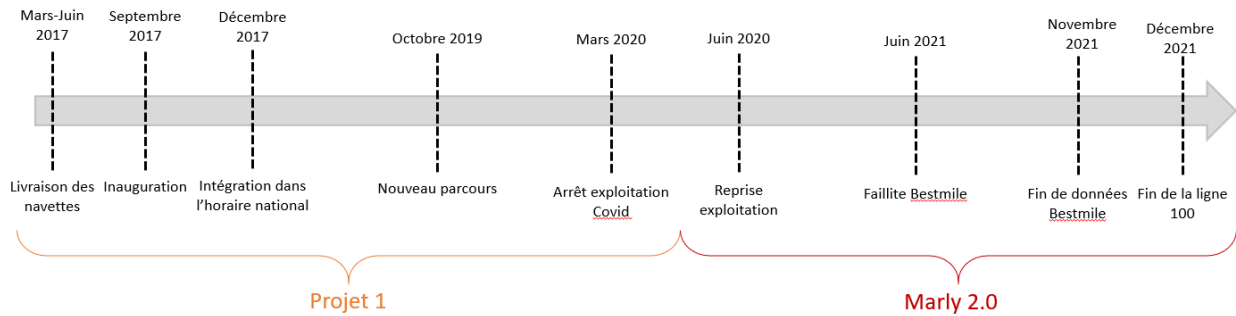


Figure 3 - Etapes du projet 1 et 2 (Source : TPF)

4. Bilan détaillé du 01.10.2021 au 10.12.2021

Le précédent rapport intermédiaire couvrait la période d’avril à septembre 2021. Ce chapitre a pour but de détailler les événements qui se sont produits durant les mois d’octobre, novembre et décembre 2021 précédant l’arrêt d’exploitation des navettes.

Tableau 1 - Problèmes rencontrés du 01.10-10.12.2021

Problème	Mesures prises / en cours
Voiture bloquant le terminus Epinettes	
Travaux MIC – zone de sortie de site	Collaboration avec le chantier
Dysfonctionnement lidar	Intervention Navya
Calibration 3D et lidars	Intervention Navya
Défaut ECU (démarrage navette en position haute)	Intervention Navya, remplacement EC
Détection pente	Intervention Navya, Recalibrage des lidars

- Voitures bloquant le terminus Epinettes
Durant les trois derniers mois d’exploitation, il est arrivé plusieurs fois que des voitures stationnent devant le home des Epinettes bloquant le passage des navettes. Généralement, les grooms manœuvrent la navette en marche arrière afin de la repositionner correctement sur le terminus. Ils peuvent ainsi repartir à l’heure en mode automatique. Ce problème est bref et ponctuel car souvent il s’agit de personnes venant chercher ou ramener des résidents du home des Epinettes.
- Travaux MIC – zone de sortie de site
Les travaux de construction sur le site du MIC se sont fortement intensifiés dans la zone de sortie du site comme le montre la photo ci-dessous sur la partie au nord notamment.



Figure 4 - Travaux sur le MIC (Source : Groupe E)

Ceux-ci ont eu pour effet d'augmenter fortement le trafic poids-lourds dans la zone. Une signalisation spécifique avec des feux de signalisation a été installée. Une collaboration s'est également mise en place afin que la cohabitation se passe au mieux. Ces travaux ont aussi eu pour effet de provoquer des retards sur l'horaire lorsqu'une machine de chantier bloquait le passage et que la navette devait attendre durant quelques minutes avant de pouvoir passer. Heureusement, les ouvriers étaient compréhensifs et ont fait leur maximum pour éviter des temps d'attente trop longs. La multiplicité des zones de chantier ont mis à mal les temps de parcours et le pourcentage de kilomètres effectués en navettes.

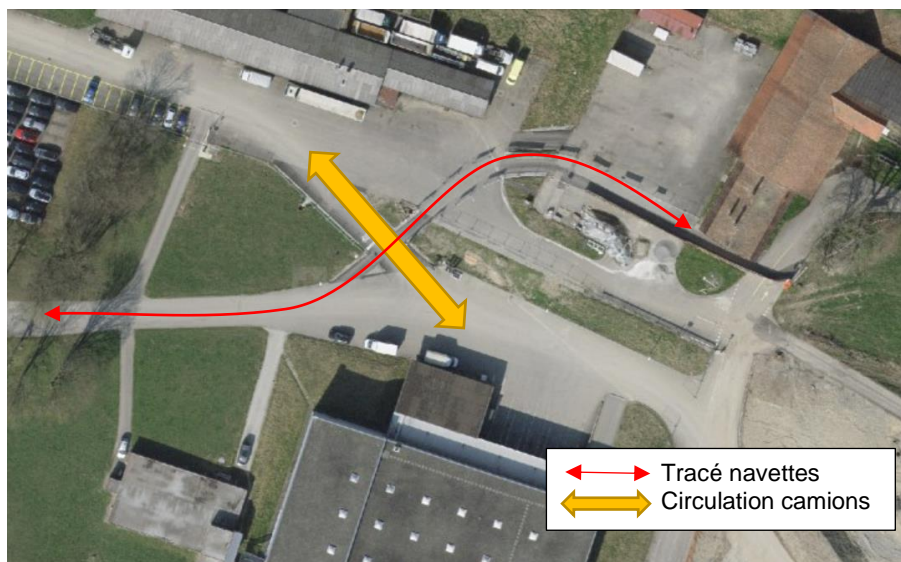


Figure 5 - Zone de conflit entre navettes et camions (Source : map.geo.admin.ch)

- **Dysfonctionnement lidar**
Lorsqu'un lidar dysfonctionne, un message d'erreur s'affiche sur le Dashboard de la navette. Cette dernière ne peut ainsi plus rouler en mode autonome mais il est toujours possible de rouler en mode manuel. Pour remédier à ce problème, Navya doit intervenir sur place pour changer le lidar. Des problèmes d'approvisionnement au niveau mondial à la suite du Covid ont retardé les changements de lidars durant la dernière période de test.

- **Calibration 3D et lidars**
Après le changement d'un ou plusieurs lidars, une calibration est nécessaire pour garantir leur bon fonctionnement. Pour calibrer les lidars et la 3D, le groom doit effectuer des cercles en forme de huit en mode manuel à proximité directe d'un mur sans surface vitrée et végétation. Avec les travaux sur le site, il était difficile de trouver un endroit satisfaisant. La calibration a finalement pu être réalisée au centre de maintenance des TPF à Givisiez lors d'une intervention sur site de Navya. Cette problématique a fait perdre énormément de temps pour la remise en mode automatique de la navette.
- **Détection pente**
A la sortie du site, les navettes doivent franchir une pente relativement importante (environ 10%) et courte. Les lidars détectaient régulièrement cette pente comme un obstacle provoquant un arrêt brusque et une reprise en mode manuel par le groom. Pour remédier au problème, Navya a modifié quelques paramètres des lidars afin d'augmenter légèrement la hauteur de vision du lidar et permettant ainsi d'éviter que le sol soit détecté par les navettes.



Figure 6 - Pente détectée (Source : TPF)

,

5. Résultats finaux d'expériences

Ce chapitre présente les résultats finaux du deuxième projet d'expérimentation. Une première partie rappelle le parcours et les caractéristiques principales des navettes. Les résultats sont ensuite déclinés par catégorie : les aspects techniques, l'exploitation et les données statistiques. Ensuite, les résultats du projet téléopération sont présentés et une étude de comparaison entre les systèmes routiers et ferroviaires autonomes et les impacts de leur application au sein des TPF est décrite.

5.1. Rappel : Parcours et horaires

Pour rappel, le parcours du projet Marly 2.0 est identique au parcours mis en service en octobre 2019. Deux arrêts se situent sur le site du Marly Innovation Center et le dernier constitue le terminus des Epinettes à proximité de l'arrêt de bus Marly, Cité. Le tracé mesure 950 mètres environ. Le tronçon du parcours dans le quartier des Epinettes est une route publique tandis que le reste du tracé se situe sur la propriété privée du Marly Innovation Center.




Figure 7 - Tracé et arrêts (Source : map.geo.admin.ch)

Une nouveauté du parcours est la programmation en automatique de la sortie et de l'entrée dans le garage des navettes. Elles peuvent ainsi parcourir et circuler le long de la route d'accès en mode autonome. A cause des travaux de construction sur le site, l'accès d'entrée au site a été modifié plusieurs fois pour garantir le passage des navettes. Des aménagements et de nouveaux tronçons de route ont été construits par le MIC dans le même périmètre en décalant juste la route de quelques mètres pour garantir l'exploitation des navettes. La plus importante modification de tracé a été cartographiée par Navya afin que les navettes puissent continuer à circuler en mode autonome. Les modifications de moindres importances n'ont pas entraîné de mise à jour de la cartographie à cause des coûts supplémentaires non supportables pour le projet.



Figure 8 - Navettes dans le garage et Figure 9 - Accès au garage en mode automatique (Source : TPF)

Durant la période horaire 2020 et 2021, les navettes circulaient officiellement chaque demi-heure entre 6h et 18h30 ainsi qu'à une cadence de 15 minutes entre 6h30 et 9h30 ainsi qu'entre 16h et 18h selon l'horaire ci-dessous.

20.100 Marly Epinettes - Marly Innovation Center Admin (Bus automatisé)  État: 10. Novembre 2020

Lundi-vendredi sauf fêtes générales


→

	10262	10268	10170	10171	10172	10173	10174	10175	10176	10177	10178	10179	10181	10183
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Marly, Epinettes	06 15	06 45	07 00	07 15	07 30	07 45	08 00	08 15	08 30	08 45	09 00	09 15	09 45	10 15
Marly, Innovation Center Admin	06 20	06 50	07 05	07 20	07 35	07 50	08 05	08 20	08 35	08 50	09 05	09 20	09 50	10 20
Marly, Innovation Center Labos	06 22	06 52	07 07	07 22	07 37	07 52	08 07	08 22	08 37	08 52	09 07	09 22	09 52	10 22
Marly, Innovation Center Admin	06 24	06 54	07 09	07 24	07 39	07 54	08 09	08 24	08 39	08 54	09 09	09 24	09 54	10 24

	10185	10187	10189	10191	10193	10195	10197	10199	10201	10203	10205	10207	10208	10209
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Marly, Epinettes	10 45	11 15	11 45	12 15	12 45	13 15	13 45	14 15	14 45	15 15	15 45	16 15	16 30	16 45
Marly, Innovation Center Admin	10 50	11 20	11 50	12 20	12 50	13 20	13 50	14 20	14 50	15 20	15 50	16 20	16 35	16 50
Marly, Innovation Center Labos	10 52	11 22	11 52	12 22	12 52	13 22	13 52	14 22	14 52	15 22	15 52	16 22	16 37	16 52
Marly, Innovation Center Admin	10 54	11 24	11 54	12 24	12 54	13 24	13 54	14 24	14 54	15 24	15 54	16 24	16 39	16 54

	10210	10211	10212	10213	10214	10215
	10	10	10	10	10	10
Marly, Epinettes	17 00	17 15	17 30	17 45	18 00	18 15
Marly, Innovation Center Admin	17 05	17 20	17 35	17 50	18 05	18 20
Marly, Innovation Center Labos	17 07	17 22	17 37	17 52	18 07	18 22
Marly, Innovation Center Admin	17 09	17 24	17 39	17 54	18 09	18 24

Figure 10 - Horaire ligne 100, direction MIC

20.100 Marly Innovation Center Admin - Marly Epinettes (Bus automatisé)  État: 10. Novembre 2020

Lundi-vendredi sauf fêtes générales

←

	10263	10264	10216	10217	10218	10219	10220	10221	10222	10223	10224	10225	10227	10229
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Marly, Innovation Center Admin	06 00	06 30	06 45	07 00	07 15	07 30	07 45	08 00	08 15	08 30	08 45	09 00	09 30	10 00
Marly, Innovation Center Labos	06 02	06 32	06 47	07 02	07 17	07 32	07 47	08 02	08 17	08 32	08 47	09 02	09 32	10 02
Marly, Epinettes	06 09	06 39	06 54	07 09	07 24	07 39	07 54	08 09	08 24	08 39	08 54	09 09	09 39	10 09

	10231	10233	10235	10237	10239	10241	10243	10245	10247	10249	10251	10253	10254	10255
	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Marly, Innovation Center Admin	10 30	11 00	11 30	12 00	12 30	13 00	13 30	14 00	14 30	15 00	15 30	16 00	16 15	16 30
Marly, Innovation Center Labos	10 32	11 02	11 32	12 02	12 32	13 02	13 32	14 02	14 32	15 02	15 32	16 02	16 17	16 32
Marly, Epinettes	10 39	11 09	11 39	12 09	12 39	13 09	13 39	14 09	14 39	15 09	15 39	16 09	16 24	16 39

	10256	10257	10258	10259	10260	10261
	10	10	10	10	10	10
Marly, Innovation Center Admin	16 45	17 00	17 15	17 30	17 45	18 00
Marly, Innovation Center Labos	16 47	17 02	17 17	17 32	17 47	18 02
Marly, Epinettes	16 54	17 09	17 24	17 39	17 54	18 09

Figure 11 - Horaire ligne 100, direction Epinettes

5.2. Rappel : Descriptions des navettes

Les deux navettes sont fabriquées par le constructeur Navya et peuvent transporter chacune 11 personnes assises et 1 opérateur debout. Le poids total maximal autorisé est de 3'450 kg et ses dimensions sont 4.75 m de long, 2.11 m de large et 2.65 m de haut. Sa vitesse d'exploitation maximale est de 25 km/h. Les TPF possèdent deux navettes, l'une de couleur rouge portant le numéro de véhicule 699 (P27 pour Navya) et l'autre de couleur verte ayant le numéro 698 (P40 pour Navya). En cas de problème, un véhicule de type Renault Kangoo est utilisé pour remplacer la ou les navettes défectueuses.



Figure 12 – Navette 699 rouge et Navette 698 verte (Source : TPF)

Les écrans avant et arrière donnant sur l'extérieur permettent de faire de l'information aux voyageurs en indiquant le numéro de la ligne et sa destination. L'écran intérieur sert aux usagers pour la sélection de leur arrêt et d'écran de contrôle pour l'opérateur à bord.

Un parcours est cartographié et implémenté dans la navette. Un couloir virtuel est créé autour de cette dernière et dès qu'un obstacle se trouve dans celui-ci, la navette réagit par rapport à la distance et à l'angle d'approche. Par exemple, un vélo dépasse la navette : si le cycliste dépasse la navette avec une distance et un angle de rabattement acceptable, celle-ci va continuer sa route normalement. En revanche, si le cycliste frôle la navette et/ou se rabat juste devant elle va s'arrêter. Ce type de freinage est brusque mais plus doux qu'un freinage d'urgence. Dans le cas d'un obstacle fixe, la navette s'arrête puis le groom relance le mode automatique dès que l'obstacle est évité. Dès qu'un défaut technique est constaté par la navette, elle s'arrête jusqu'à sa résolution, par exemple la mauvaise fermeture d'une porte, le patinage des roues, une perte de localisation, etc.

Des contrats de prestations de service ont été conclus avec Navya. Cela implique que ces derniers sont responsables de la maintenance du véhicule et des mises à jour de logiciel. Ils assurent également un service de supervision qui vient en aide à distance et en direct aux grooms.

Les TPF ont également décidé de travailler avec la start-up suisse Bestmile. Cette dernière avait pour mission de créer une interface permettant à la navette de connaître la position des bus de la ligne 1. Malheureusement, Bestmile a fait faillite en juin 2021 et le projet final n'a pas pu aboutir. Toutefois, Bestmile avait développé un Dashboard permettant aux opérateurs du Centre d'exploitation de suivre en direct les navettes ainsi qu'une application destinée aux opérateurs et une seconde destinée aux clients.

5.3. Aspects techniques

Durant ce projet, des événements très variés ont perturbé le bon fonctionnement des navettes en mode autonome sur la période d'avril 2020 à décembre 2021. Le tableau ci-dessous résume les perturbations ayant pour cause des aspects techniques notamment en lien direct avec le software de la navette, des événements externes ou des problèmes mécaniques par exemple.

Résumé des problèmes rencontrés
Tableau 2 - Problèmes rencontrés

Description	Véhicules		Périodes				Résolution / Remarque
	Navette rouge	Navette verte	1*	2*	3*	4*	
Véhicules franchissant interdiction			x			x	Collaboration avec police locale et dénonciation via MIC
Conditions météorologiques			x	x	x	x	Utilisation du Kangoo de remplacement si nécessaire
Travaux MIC			x	x	x	x	Utilisation du Kangoo de remplacement si nécessaire
Lidars	x	x	x	x	x	x	Changement du lidar défectueux
Calibration lidars et 3D	x	x	x		x	x	Difficultés à trouver une zone compatible pour la calibration
Instabilités 3G / problème routeur	x	x	x	x	x		Vérification du réseau de l'opérateur, changement de routeur
Surchauffe ordinateurs	x	x	x				Arrêt des navettes, ouverture du capot pour refroidir
Absence personnel				x			Diminution des prestations ou utilisation du Kangoo pour garantir la cadence
Difficultés à fermer les portes	x			x			Apparitions aléatoires, fermeture via bouton poussoir
Détection pente de la rampe	x	x		x			Nouvelle calibration lidars + ajustements de la hauteur de perception
Détection escaliers Epinettes	x	x		x			Nouvelle cartographie et recalibration des lidars
Vibrations moto-réducteur	x			x			Remplacement du moto-réducteur
Amortisseurs et compresseurs (yc fusibles)	x	x	x	x	x		Remplacement
Erreur logiciel après récupération de logs	x			x			Reset, mise à jour du software
Traces d'usure sur prises							Remplacement des éléments usés
Climatisation coule		x			x		Vérification, écoulement normal
Capot bloqué	x				x		Réparation d'une pièce défectueuse
Télécommande des feux défectueuse					x		Réparation d'une pièce défectueuse
Problème GNSS							Redémarrage antenne

*Définition des périodes

1 : Avril à septembre 2020

2 : Octobre 2020 à mars 2021

3 : Avril à septembre 2021

4 : Septembre à décembre 2021

Exemples de quelques problèmes rencontrés

Lidar

Durant les quatre années d'exploitation, il s'est avéré que les lidars étaient des éléments fragiles dont les dysfonctionnements entraînent beaucoup de perturbations pour la circulation en mode autonome des navettes. Ces dysfonctionnements peuvent se manifester de différentes manières : un bruit anormal provenant directement du lidar concerné, des erreurs apparaissant sur le dashboard ou des arrêts intempestifs des navettes en mode autonome. Dès l'apparition d'une anomalie, les TPF créent un ticket dans le système de Navya. Ce dernier établit un diagnostic plus précis pour confirmer qu'un remplacement du lidar défectueux est nécessaire ou qu'une intervention à distance suffit en collaboration avec les grooms. Il organise ensuite l'intervention d'un technicien sur site si besoin. Après le remplacement du lidar défectueux, une nouvelle calibration doit être effectuée soit à distance soit directement par le technicien. Pour ce faire, des cercles en forme de huit sont réalisés face à un grand mur lisse durant environ 10 minutes puis les données sont récupérées et traitées par Navya. La nouvelle calibration est finalement implémentée dans la navette. A cause du chantier, il a été difficile de trouver une zone compatible pour l'enregistrement de ces données. A deux reprises, il a fallu attendre le rapatriement des navettes à Givisiez pour d'autres travaux afin d'effectuer ces manœuvres. Cette contrainte a retardé plusieurs fois la remise en service des navettes en mode autonome péjorant ainsi les résultats statistiques. La recalibration a aussi permis de résoudre le problème de détection des escaliers aux Epinettes et de la pente à la sortie du site. En effet, les deux navettes percevaient l'émergence d'escaliers vers le home des Epinettes comme un obstacle malgré une nouvelle cartographie effectuée après la construction du nouveau bâtiment. Ce souci est également apparu au niveau de la pente de sortie du site. A cause de la pente raide, les lidars détectaient le sol comme un obstacle obligeant les grooms à reprendre les navettes en conduite manuelle. Un ajustement de l'inclinaison des lidars a donc été nécessaire.

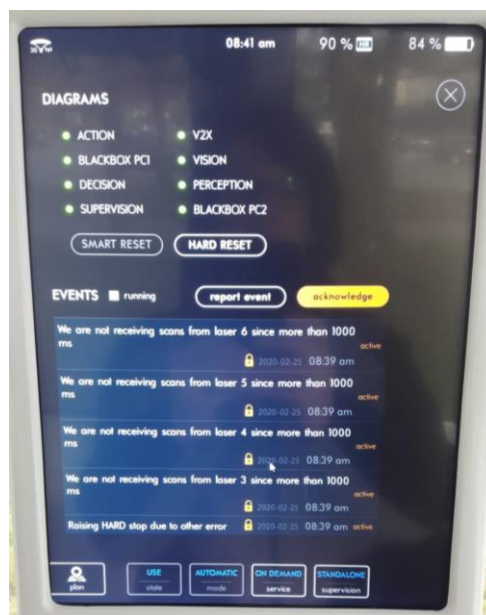


Figure 13 - Défaut lidars (Source : TPF)

Compresseurs et suspensions

Les compresseurs et les suspensions ont souvent donné du fil à retordre aux TPF. Les navettes s'équilibrent en permanence pour rester dans une position la plus horizontale possible. Les suspensions et leurs compresseurs sont ainsi très souvent sollicités. De plus, la topographie du parcours et notamment la pente en sortie de site accentuent les sollicitations. Différents types de problèmes avaient pour origine les suspensions et/ou les compresseurs durant toute l'expérimentation. En général, les grooms observent en premier lieu un affaissement au niveau des suspensions. Parfois, le compresseur est encore actif mais produit un bruit anormal ou il est

totallement hors service. Dans le capot avant se trouve une télécommande permettant de régler la hauteur des suspensions par exemple lorsque les navettes sont transportées sur une remorque. En cas de problème, les boutons sur cette télécommande clignotent indiquant ainsi un dysfonctionnement. Lorsqu'un compresseur est hors service, un technicien de Navya vient sur site pour le remplacer. Dans un autre cas, le problème avait pour origine un fusible défectueux. Il a dû être remplacé ainsi que le porte-fusible. Sur la navette rouge, le calculateur des suspensions a cessé de fonctionner et a été également remplacé. Dans tous les cas, le technicien de Navya procède à une nouvelle calibration des suspensions à chaque intervention.

Instabilité 3G et problème routeur

Il est arrivé quelques fois d'avoir des instabilités de la réception du réseau 3G. En effet, les navettes perdaient le signal à quelques endroits du parcours durant un certain laps de temps. Des investigations auprès de l'opérateur de téléphonie local n'a pas montré d'anomalies. Sur l'une des deux navettes, il s'est avéré que le routeur était défectueux et a donc été remplacé. Ces instabilités de la 3G sont aléatoires et donc non prévisibles. Après quelques jours, le problème a disparu. Parfois, un reset de l'antenne sur le toit du MIC permet de résoudre les erreurs de communication. Durant le premier projet, les mêmes soucis avaient été constatés également de manière aléatoire. Grâce à ce test, il peut être souligné qu'il est primordial d'avoir un excellent réseau de communication pour une exploitation sûre en mode autonome de ce type de véhicules.

Divers problèmes mécaniques

Divers soucis techniques sont également apparus durant ce second projet. Par exemple, sur l'une des navettes, la calandre avant était bloquée. Il n'était donc plus possible de l'ouvrir grâce au bouton se trouvant dans le capot avant. Cependant, il était toujours possible de l'ouvrir en glissant les mains sous la calandre grâce à une gâchette manuelle. Un technicien de Navya est intervenu pour remplacer la pièce défectueuse. Les portes ont également subi différentes avaries. Il était, par exemple, parfois impossible de les fermer automatiquement. Il fallait donc utiliser le bouton poussoir ou le robinet de secours. Étonnamment après quelques occurrences, le problème a disparu sans intervention externe. Durant les deux projets, lors des chaudes journées d'été, c'est-à-dire quand les températures dépassent 30°C, il arrivait que le moteur et/ou les ordinateurs surchauffent dans la montée entre le MIC et les Epinettes. Les grooms devaient alors sécuriser le véhicule, l'éteindre et ouvrir les capots pour refroidir le système. Les navettes pouvaient ensuite continuer à circuler. Les grooms ont donc mis en place une procédure pour les chaudes journées d'été. Ils faisaient rouler de manière alternée chaque navette durant deux heures afin d'éviter les surchauffes. Cette procédure s'est avérée efficace. Finalement, il est aussi arrivé que de l'eau provenant de la climatisation coule le long des portes. Après vérifications par un technicien de Navya, le problème leur est connu et s'avère anodin. Les navettes ont donc pu continuer à être utilisées. Ces divers problèmes mécaniques ont eu des conséquences relativement importantes sur l'exploitation.

Divers problèmes liés à l'informatique

Outre des problèmes purement techniques ou mécaniques, la partie software et hardware a également généré son lot d'anomalies. Par exemple, le PC1 de la navette rouge a dû être changé car il ne s'allumait plus du tout. Il arrivait également parfois qu'après démarrage l'écran du Dashboard reste noir contraignant ainsi les grooms à éteindre puis à redémarrer la navette. Quelques fois, le Dashboard s'est mis à clignoter. Après des investigations de Navya à distance, ces problèmes ont pu aussi être résolus par des interventions sur les versions de logiciels ou la correction de certains fichiers. En comparaison avec le projet 1, les mêmes types de problèmes se sont produits avec des occurrences assez similaires. De manière générales, les principales faiblesses se situent sur les éléments tels que les lidars, suspensions et erreurs de logiciel.

5.4. Exploitation

En termes d'exploitation, ce second projet a été relativement stable malgré quelques incidents à déplorer. Les éléments perturbateurs sont principalement des facteurs externes sur lesquels l'exploitant a peu d'emprise. La sécurité est primordiale et doit être garantie en tout temps pour le personnel, les passagers et les usagers externes. L'OCN effectue chaque année une expertise des deux navettes comprenant des tests de freinage et un contrôle des fonctionnalités basiques (phares, pneus, clignotants, etc.). Navya effectue des mises à jour à distance régulièrement pour que les véhicules soient équipés du logiciel le plus récent et puissent ainsi profiter des améliorations développées par Navya. Lorsque les conditions d'utilisation ne sont pas satisfaisantes, notamment lorsque les conditions météorologiques sont difficiles ou qu'une tranchée est creusée au milieu de la chaussée pour le chantier, les grooms ont pour consigne d'assurer les prestations avec le Renault Kangoo de substitution. Quelques exemples ayant perturbé l'exploitation sont cités ci-après.

Exemples de quelques problèmes rencontrés

Personnel

Durant le projet, une augmentation des absences du personnel a été observée. Une majorité des grooms a travaillé durant l'entier de l'expérimentation soit de 2017 à 2021. De manière réaliste, il faut admettre qu'une perte de motivation a été constatée durant les derniers mois de l'essai. Cela peut s'expliquer par le fait qu'après 4 ans les tâches peuvent être répétitives et manquer de stimulations. De plus, une fois la fin de l'exploitation annoncée, il y a eu un relâchement le temps que des propositions pour un nouvel emploi interne soient faites à chaque groom. Pour une nouvelle exploitation, il serait intéressant de mieux considérer le niveau de stimulations des grooms. En effet, des tâches supplémentaires concernant le suivi pourraient leur être confiées en dehors des heures de surveillance des navettes. Il pourrait s'avérer judicieux d'avoir une alternance entre la période de surveillance des navettes et des tâches de suivi du projet ou de développements pour autant que la taille de l'équipe soit relativement petite pour faciliter les transferts d'informations. Après quatre années de test, les qualités d'un bon groom peuvent être définies de la manière suivante :

- Bonne gestion du stress et des imprévus
- Capacité d'analyse et orienté solutions
- Capacité d'anticipation
- Aimer les contacts avec la clientèle
- Ouverture d'esprit et flexibilité aux changements
- Être consciencieux et soigneux
- Savoir faire preuve de diplomatie

En plus des éléments cités ci-dessus, il est aussi important de former correctement les grooms afin qu'ils puissent avoir une très bonne connaissance technique des navettes et du software pour gagner en efficacité lors des diagnostics par téléphone avec Navya.

Bestmile

La mise en faillite de Bestmile en juin 2021 a été une grande surprise pour les TPF. En effet, le Covid n'a pas permis à cette entreprise de concrétiser d'importants projets et l'a contrainte à fermer ses portes. Les données récoltées sur le Dashboard étaient à disposition jusqu'en début novembre avant que la plateforme ne soit totalement désactivée. Des premiers tests avaient été effectués pour l'application destinée aux grooms et dans laquelle ils pouvaient directement indiquer le nombre de passagers et les problèmes rencontrés. Malheureusement, il n'y a pas eu assez de données récoltées pour obtenir des résultats fiables par ce biais et mettre en production effective l'application auprès de tous les grooms. Toutefois, ces données ont pu être récoltées grâce à des formulaires papier remplis par les grooms chaque jour minimisant la perte d'informations.

Chantier

Le chantier sur le site du MIC a engendré beaucoup de perturbations durant le projet Marly 2.0. En effet, la circulation des camions s'est largement intensifiée entraînant des blocages de la circulation ainsi que des situations dangereuses. En effet, la route du chantier croisait la route des navettes et, malgré la présence de signaux Stop et de feux pour les camions, les navettes ont dû faire face plusieurs fois à des camions ne respectant pas la signalisation. Des rappels ont été effectués auprès des entreprises afin de garantir une bonne cohabitation. Les impacts sur les voyageurs ont été des retards de quelques minutes sur l'horaire prévu et des freinages inopinés. Il est également arrivé que les barrières de chantier tombent à cause du vent et empêchent ainsi la circulation des navettes le temps qu'elles soient remises en place par les ouvriers.



Figure 14 - Travaux du nouvel écoquartier (Source : MIC)

Incident mise en mouvement

Le 6 janvier 2021, un incident de mise en mouvement d'une navette a été signalé. Le groom présent a sorti une navette du garage et l'a stationnée allumée devant le local de pause des grooms durant moins de 5 minutes. Lorsque le groom est ressorti, il a constaté que deux personnes étaient entrées dans la navette et avaient appuyé sur l'écran de contrôle. La navette n'était pas sur un arrêt officiel mais sur son parcours planifié entre le garage et la route principale d'où le fait qu'elle a démarré lors de la sélection d'un arrêt sur l'écran. Le groom a couru pour rattraper la navette et s'est blessé à un genou. Un stop est programmé à l'intersection avec la route principale immobilisant la navette et permettant finalement au groom d'intercepter la navette et les clients. Ces derniers ont affirmé qu'ils pensaient qu'elle était parfaitement autonome comme à l'EPFL. Cependant, aucune navette sans accompagnant n'a été mise en service en Suisse. Il n'a pas été possible de vérifier si les deux personnes étaient de bonne foi ou non. Le groom n'avait pas correctement verrouillé la navette devant le local. Après cet incident, la procédure a été rappelée aux grooms et des mesures supplémentaires ont été prises pour renforcer le processus afin d'éviter un nouvel incident de ce type.

5.5. Données statistiques

Vitesse

Comme déjà mentionné, à la suite de la faillite de Bestmile les données ont pu être récoltées jusqu'au 4 novembre 2021. Entre la reprise d'exploitation post Covid en juin 2020 et avril 2021, les vitesses moyennes mensuelles sont demeurées très stables. Il peut être constaté que les vitesses de la navette rouge et de la navette verte sont similaires avoisinant une vitesse moyenne de 7.4 km/h durant cette même période. Les problèmes techniques récurrents sur la navette rouge dès le mois d'avril 2021 ont eu pour effet d'augmenter fortement la vitesse moyenne car le taux d'utilisation en mode manuel était plus conséquent. Durant toute la durée de l'expérience, il

a pu être observé que les grooms conduisent plus vite en manuel que la programmation en mode automatique. Cet effet s'est encore plus accentué avec le temps car les grooms avaient une plus grande expérience de conduite et étaient donc plus à l'aise. Les vitesses ont aussi augmenté pour la navette verte mais de manière moins significative. Durant la totalité du second projet, la vitesse moyenne de la navette rouge était de 8.2 km/h et de 7.8 km/h pour la navette verte.

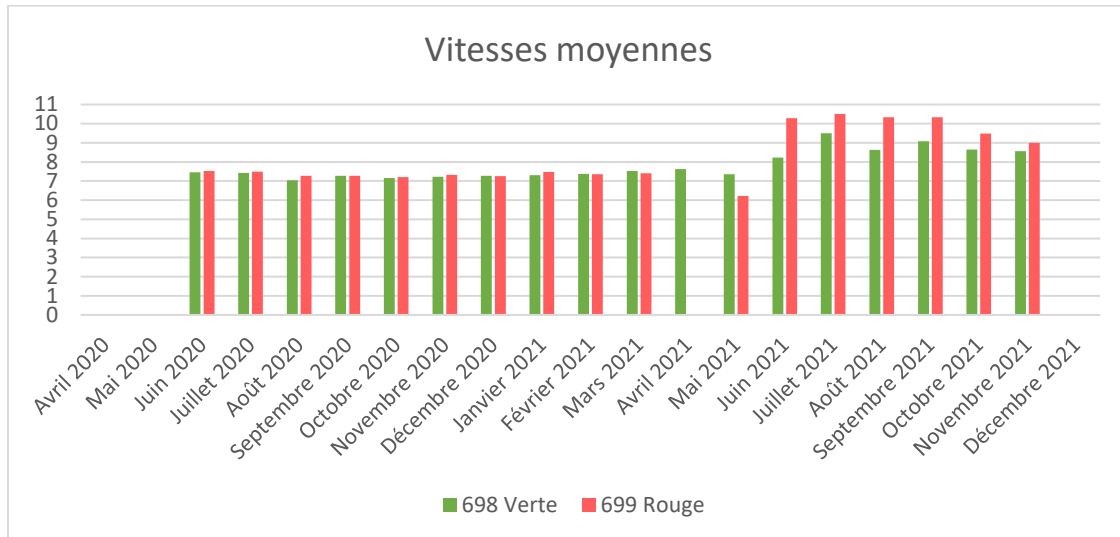


Figure 15 - Vitesses moyennes projet Marly 2.0

En comparaison avec le premier projet, les vitesses moyennes sont un peu plus faibles mais indiquent un meilleur taux en mode autonome. Pour rappel durant le premier projet, la vitesse moyenne de la navette rouge était de 8.4 km/h et de 8.2 km/h pour la navette verte.

Conduite en manuel

Durant ce projet, la navette rouge a circulé durant 48% du temps en mode manuel et la navette verte 39%. Avant le mois de juin, la moyenne était de 30.5 %. Ce taux a fortement augmenté durant l'été à cause principalement des travaux sur le site. Les problèmes techniques récurrents sur la navette rouge ont également eu un impact négatif sur ce résultat. La valeur la plus basse durant cette période est de 22%. La complexité du parcours (végétation et mixité du trafic) ainsi que les interactions avec le chantier du MIC constituent les principales explications pour justifier ces chiffres.

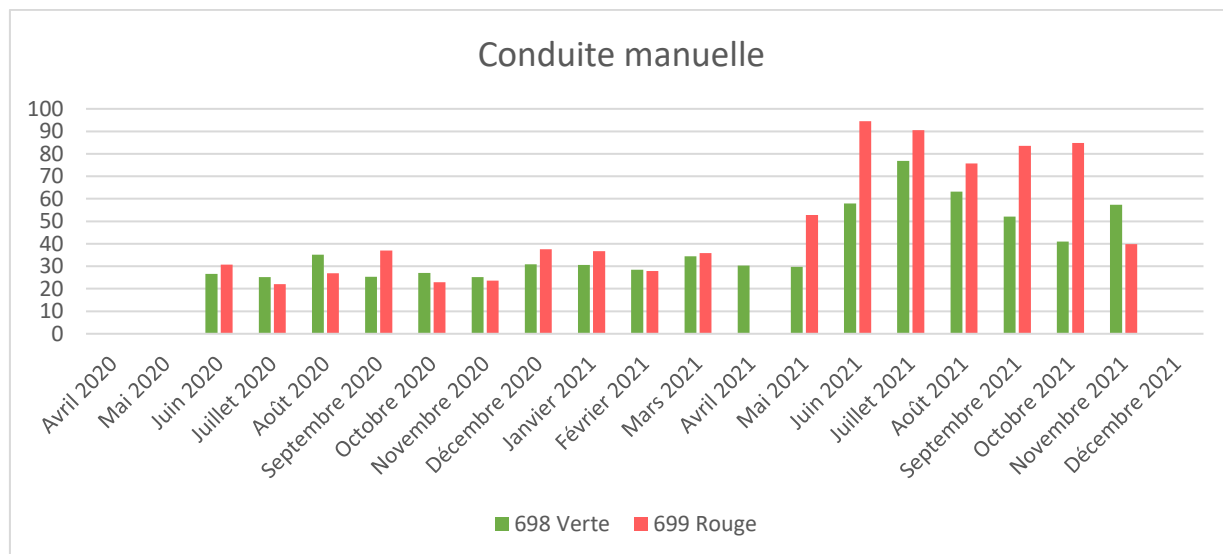


Figure 16 - Conduite en manuel projet Marly 2.0

Durant le premier projet, la navette rouge a circulé à 45% en mode manuel et la navette verte à 44%. Les résultats des mois de juin 2020 à mai 2021 ont été nettement meilleurs que les données du premier projet avant une dégradation au 2^{ème} semestre 2021. Une stabilité durant cette période a été atteinte dans l'exploitation des navettes grâce aux trajets au garage totalement cartographiés. La moyenne générale des deux projets se monte à 44.2%.

Le graphique ci-dessous permet de visualiser le lien entre la vitesse moyenne et la conduite en mode manuel. Il met bien en évidence que le fait que lorsque le taux en manuel augmente, la vitesse augmente également.

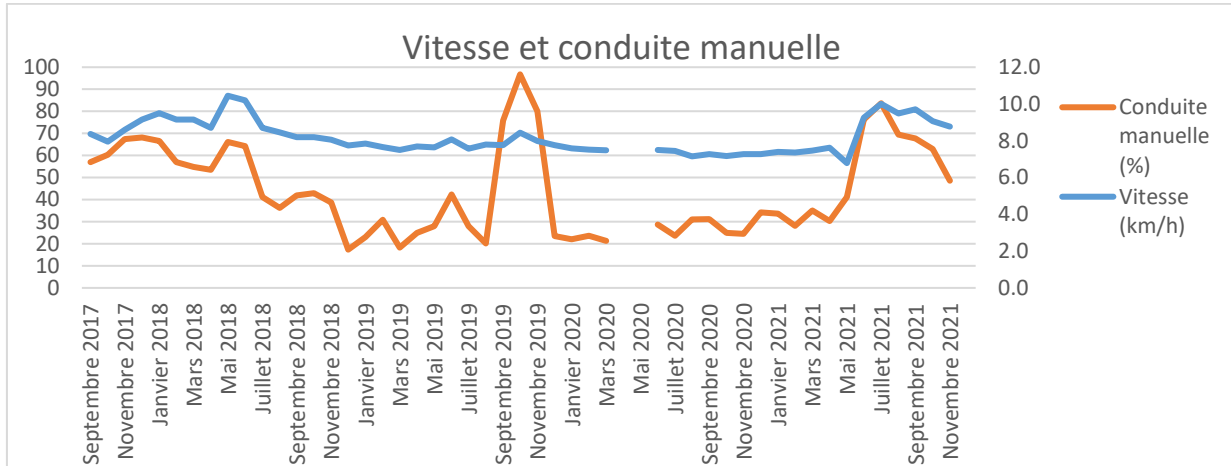


Figure 17 - Corrélation entre vitesse moyenne et conduite en manuel

Nombre de kilomètres parcourus

Passablement de kilomètres ont été effectués avec le Kangoo durant le projet Marly 2.0. Ce phénomène s'explique surtout par le chantier et les conditions météorologiques. La consigne pour les grooms est claire, la sécurité prime toujours et en cas de doute sur la faisabilité du parcours en navettes, le Kangoo est utilisé. Ce principe a eu comme conséquence néfaste qu'au lieu de circuler uniquement durant quelques courses problématiques avec le Kangoo, les grooms ont eu tendance au fil du temps à garder le Kangoo sur une demi-journée et à refaire l'échange durant leur pause ou à la fin du service.

Au total, 61 % des kilomètres soit 12'704 kilomètres ont été effectués par les navettes. Ce chiffre est à nuancer avec une autre réalité du terrain. Lorsque les grooms utilisent le Kangoo il arrive parfois qu'ils fassent plus de courses qu'indiquées à l'horaire notamment à cause de la plus faible capacité de transport ce qui a pour conséquence de faire augmenter les kilomètres en Kangoo au détriment de ceux effectués en navettes.

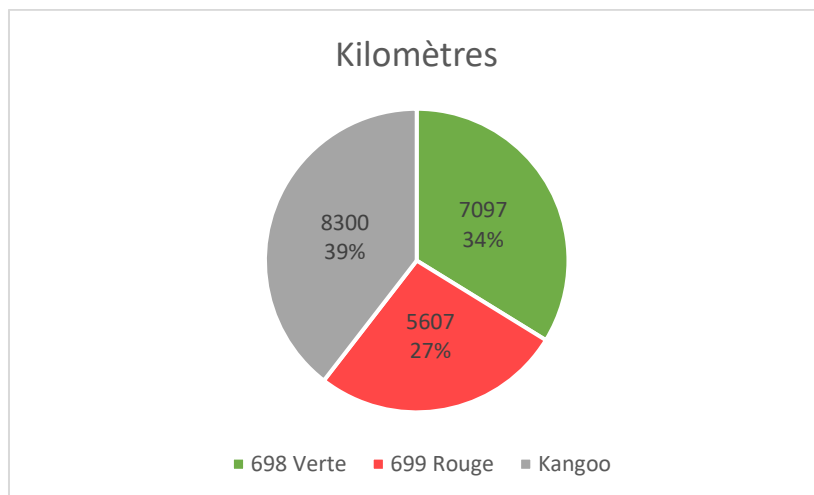


Figure 18 - Kilomètres parcourus projet Marly 2.0

Le prochain graphique montre l'évolution de la répartition des kilomètres mensuellement entre les véhicules. Les périodes qui ont été les plus critiques sont celles de mai à septembre 2021 et de novembre à décembre 2021, périodes également valables pour les autres données statistiques.

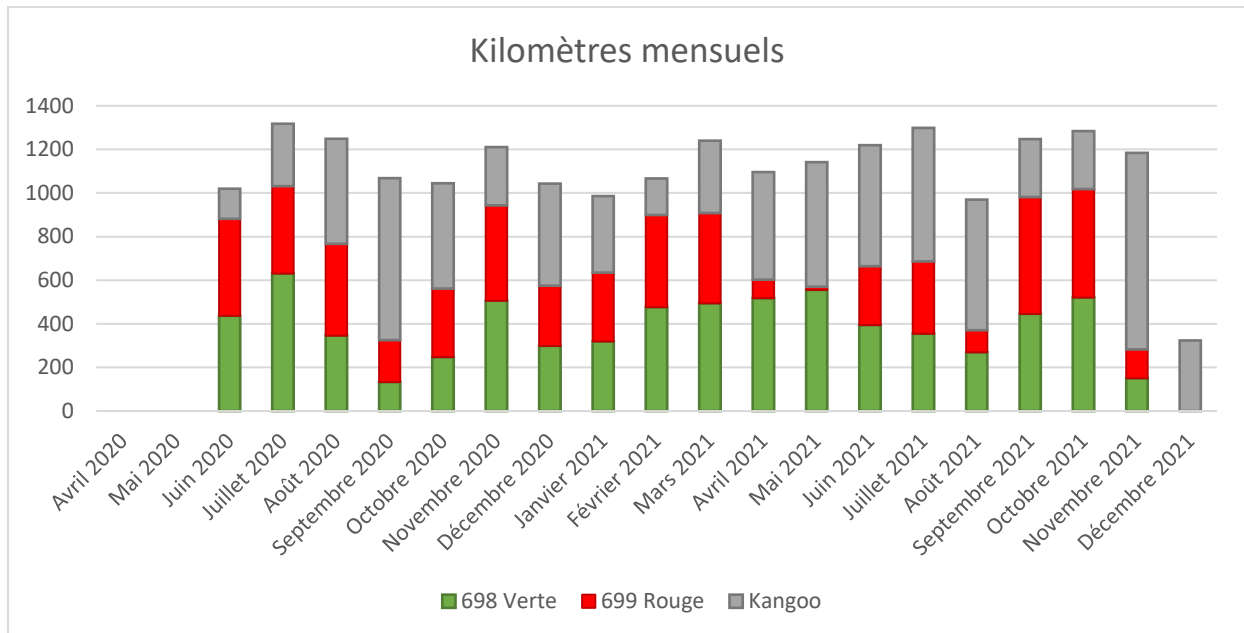


Figure 19 - Kilomètres mensuels projet Marly 2.0

Durant le premier projet, 70% des kilomètres ont été effectués en navettes ce qui est ainsi supérieur aux résultats du projet Marly 2.0. Pour rappel, en décembre 2019, les adaptations des prestations à l'horaire ont conduit à une diminution des kilomètres. En valeur absolue, les kilomètres en Kangoo sont restés stables contrairement aux kilomètres des navettes qui ont diminué. Durant les projets 1 et Marly 2.0, les navettes ont parcouru un total de 46'830 kilomètres et 67% des kilomètres ont été effectués en navettes.

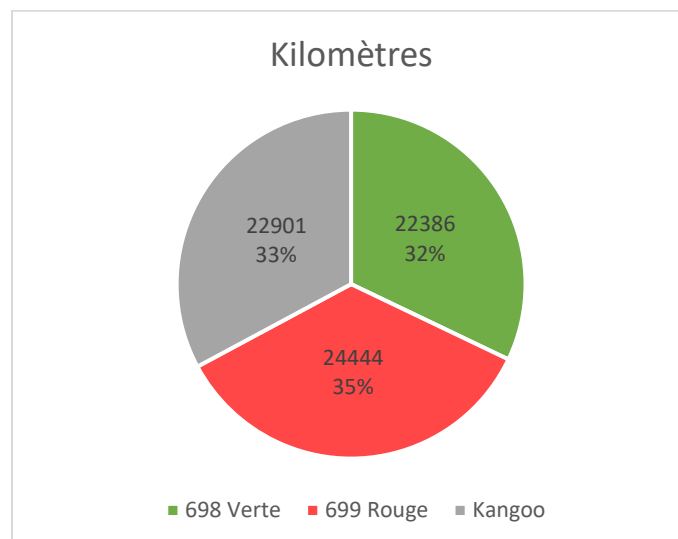


Figure 20 - Kilomètres parcourus projets 1 et Marly 2.0

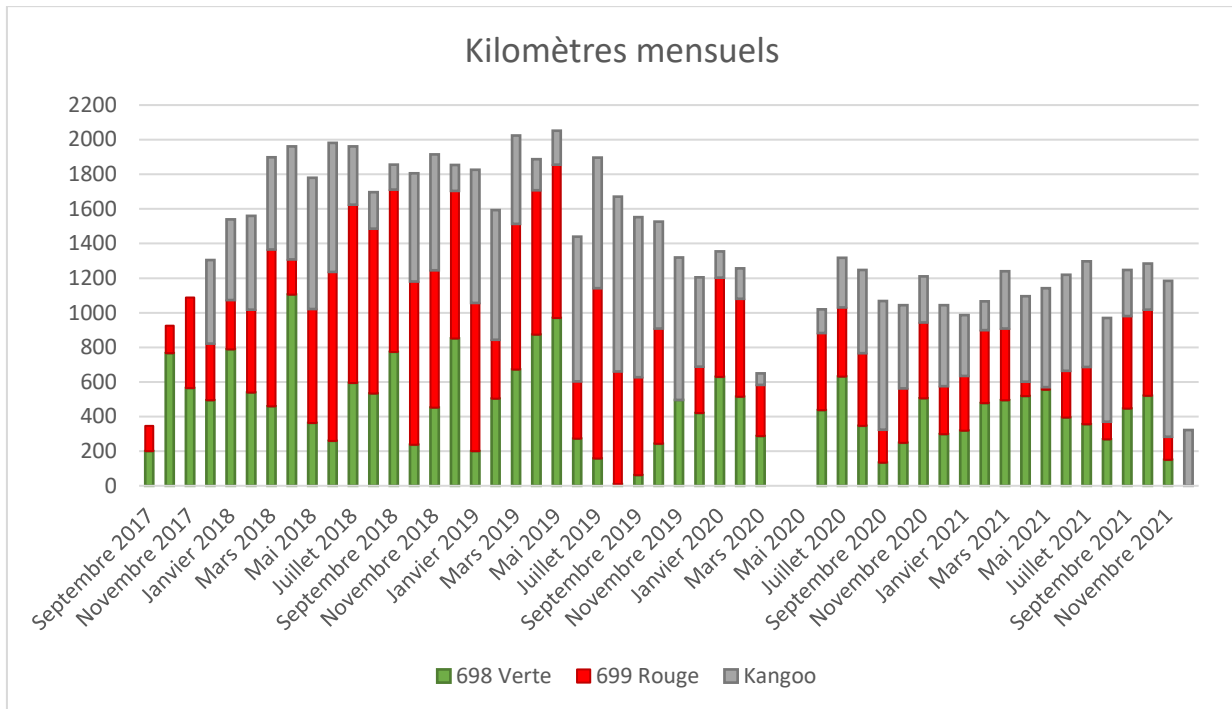


Figure 21 - Kilomètres mensuels projets 1 et Marly 2.0

Nombre de passagers transportés

Le second projet a débuté à la reprise post confinement de la première vague du Covid. Comme de manière générale dans les transports publics en Suisse, la reprise a été plutôt lente jusqu'à la fin de l'année 2020. Ensuite, le nombre de passagers transportés a augmenté au fil des mois de 2021. Les chiffres sont restés relativement stables durant la période estivale contrairement aux années précédentes où une diminution importante pouvait être observée. Contrairement aux données statistiques précédentes, les problèmes techniques sur les navettes ainsi que les perturbations engendrées par le chantier n'ont pas eu d'impact sur la fréquentation de la ligne 100. Grâce au service de substitution fait par le Kangoo, la desserte de la ligne 100 était fiable expliquant ainsi le nombre de passagers croissant malgré l'augmentation des difficultés pour faire circuler les navettes. Durant le projet Marly 2.0, 6'225 personnes ont emprunté la ligne 100.

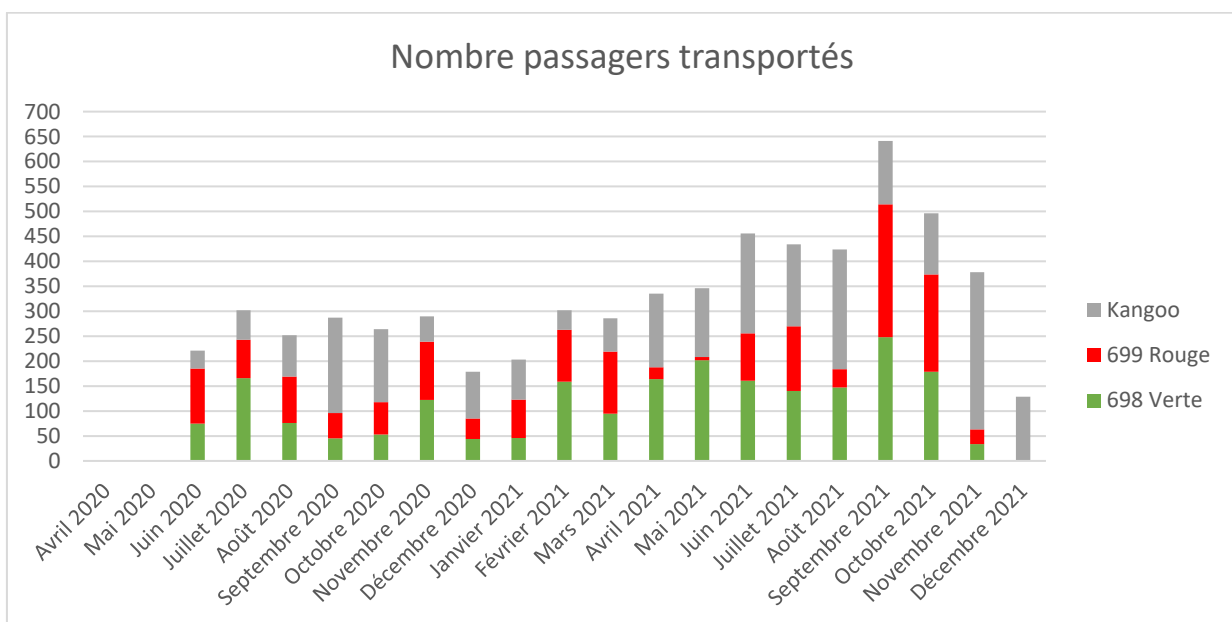


Figure 22 - Passagers transportés projet Marly 2.0

Le graphique ci-dessous donne la vue d'ensemble sur la fréquentation de la ligne 100 durant les deux projets d'expérimentation. Au total, 17'693 personnes ont été transportées entre septembre 2017 et décembre 2021.

Il peut être constaté que jusqu'à septembre 2018, beaucoup de curieux ont emprunté les navettes en plus des pendulaires. Les curieux ont diminué en 2019 et 2020 pour laisser la place quasiment uniquement à des pendulaires. L'année 2021 marque une belle progression des pendulaires laissant un présage positif quant à l'utilisation de la ligne 8 qui a remplacé la ligne 100 au changement d'horaire de décembre 2021. La fréquentation du mois de décembre 2021 ne comprend que la période du 1^{er} au 10 décembre.

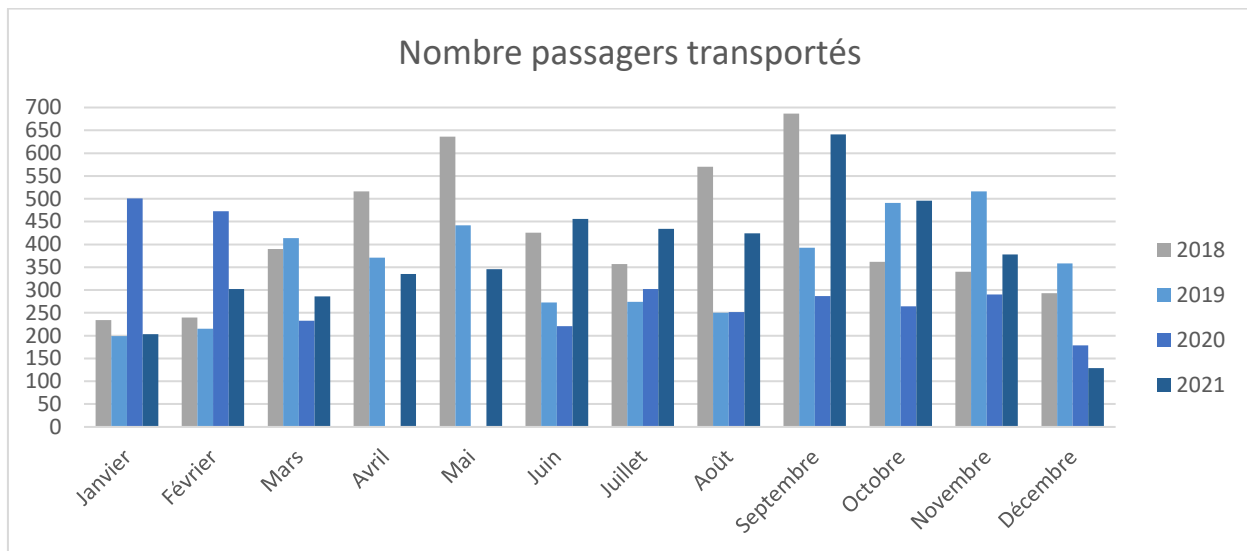


Figure 23 - Passagers transportés projets 1 et Marly 2.0

Gestion des perturbations

Il existe plusieurs types de perturbations engendrant différentes interventions. Tout d'abord, les imprévus liés au personnel sont gérés directement par le centre d'exploitation lorsque l'absence est annoncée moins de 24 heures avant le travail prévu. Au-delà de ce délai, la future absence est gérée par l'équipe de la répartition qui se charge de trouver un remplaçant.

Ensuite, les problèmes techniques des navettes peuvent être classés en deux catégories : les interventions immédiates et les interventions planifiées. Les interventions immédiates sont effectuées soit par les grooms directement soit par les mécaniciens de l'atelier des bus des TPF en fonction du type de problème. Les interventions planifiées sont réalisées par Navya exclusivement.

Le personnel TPF peut intervenir sur les éléments suivants :

- Panne de la batterie 24 Volt (Grooms et Atelier)
- Avarie pneus (Atelier)
- Changement pièces d'usure (essuie-glace, etc.) (Atelier)
- 1^{er} diagnostic sous les instructions de Navya (Grooms)

Les interventions effectuées par Navya sont planifiées environ 10 jours à l'avance permettant ainsi d'organiser les besoins spécifiques de chaque intervention (rapatriement des navettes à G7, livraison de pièces, etc.). Les problèmes de logiciel peuvent de manière générale être gérés à distance par Navya. Ce dernier intervient sur site pour les éléments suivants :

- Portes
- Systèmes de suspensions
- Systèmes de détection (lidars, etc.)
- Batterie principale
- Chaîne de traction
- Ecrans d'informations
- Changements de tout élément sauf pièces d'usure standard

Entre l'annonce de l'avarie et l'intervention de Navya sur site, les délais sont passablement variables entre quelques semaines et plusieurs mois. De plus, à la suite du COVID, les délais d'approvisionnement des pièces ont été rallongés avec un impact sur les délais d'intervention de Navya. Ce dernier a mis en place un système de tickets en ligne permettant d'annoncer tous les types de problèmes rencontrés. Un suivi est ainsi effectué et offre la possibilité aux TPF de voir les étapes de résolution et de suivre les instructions transmises par Navya pour apporter de l'aide dans le diagnostic avant une intervention sur site. Ce système permet de gagner en efficacité et Navya peut ainsi mieux préparer ses interventions et le matériel adéquat évitant des trajets supplémentaires.

Entretien

Durant le projet Marly 2.0, Navya est intervenu sur site selon le tableau suivant.

Tableau 3 - Listes des interventions de Navya

Date	Navettes	Travaux réalisés
24.06.20	P27	Contrôle du compresseur par TPF
22-23.07.20	P27	Lidar et calibration, changement fusibles compresseurs
	P40	Calibration lidar, remplacement de 2 câbles Ethernet
24-28.08.20		Formation d'un client par Navya, retouches mineures du path
01-10.12.20	P27 + P40	Contrôles techniques
25-29.01.21	P27	Contrôle bruit anormal
	P40	Remplacement berceau et triangles et amortisseurs arrières, changement connecteurs batterie 80V
08-12.03.21	P27	Remplacement rotules portes, remplacement prise, remplacement moto-réducteur
	P40	Remplacement de la prise de charge
29-30.04.21	P27	Remplacement berceau et triangles, changement lidar et calibration, remplacement IMU, calibration 3D
	P40	Remplacement klaxon, remplacement connecteur de compresseur, calibration 3D, remplacement manette
26.05.21	P27	Remplacement routeur et diverses mises à jour
	P40	Changement porte-fusibles suspension et diverses mises à jour
9-11.08.21	P27	Vérifications suspensions
	P40	Remplacement bouton calandre, vérification climatisation, contrôle compresseur
25-27.10.21	P27	Remplacement sick et calibration, changement lidars et calibration, calibration 3D, remplacement ECU
	P40	Vérification climatisation, vérifications inclinaisons sick pour détection pente, vérification suspension

Les navettes ayant cessé de circuler en décembre 2021, le dernier contrôle technique effectué par l'OCN a eu lieu en décembre 2020. Si une ré-immatriculation est planifiée, de nouveaux contrôles techniques devront être réalisés.

Disponibilité

La disponibilité des navettes est calculée en fonction des jours où chaque navette a réellement circulé par rapport au nombre de jours d'exploitation théoriques. Le nombre de kilomètres effectués chaque jour n'est pas considéré. Dans ce deuxième projet, la moyenne de disponibilité est de 77% contre 70% dans le premier. Toujours dans le second projet, la navette verte a été plus disponible avec 84 % contre 65 % précédemment tandis que le phénomène inverse est signalé pour la navette rouge avec 69% contre 75 %. Durant le projet 1, les périodes d'indisponibilité étaient principalement des jours isolés tandis que dans le projet Marly 2.0, il s'agit plutôt de jours consécutifs représentatifs de certains problèmes récurrents impliquant de plus longues périodes d'immobilisation. Dans le futur, il est primordial que les navettes atteignent des taux de disponibilité supérieurs à 90% au minimum.

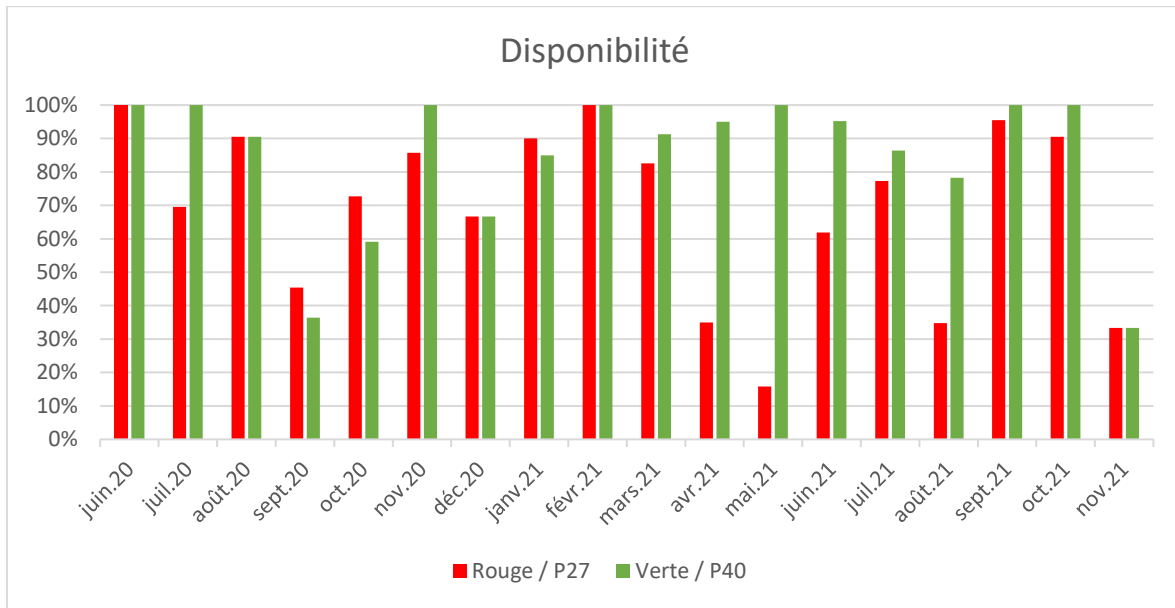


Figure 24 – Taux de disponibilité par navette

5.6. Analyse de l'amélioration de la cadence

Les sondages effectués durant le premier projet auprès des utilisateurs indiquent que la vitesse des navettes a une grande importance sur l'attractivité de la ligne. En effet, il a souvent été reproché aux navettes de circuler trop lentement ce qui constituait dans certains cas un motif de non-utilisation de ce mode de transport. Par conséquent, il a été souhaité d'étudier la problématique de la vitesse des navettes durant le projet Marly 2.0. Initialement, la HEIA-FR envisageait d'acquérir un logiciel professionnel pour effectuer des simulations informatiques utiles également pour le développement de la téléopération mais malheureusement l'achat n'a pas abouti par manque de ressources financières. Cependant, une analyse simplifiée des vitesses a été réalisée afin de déterminer les améliorations à effectuer qui permettraient d'atteindre une cadence de 7.5 minutes sur la ligne 100.

Définition des secteurs

Le parcours a été découpé en 5 secteurs afin de distinguer leurs différentes spécificités. Le secteur A comprend le secteur sur route publique tandis que le secteur B est caractérisé par la présence d'une importante végétation sur la Route de l'Ancienne Papeterie. Le secteur C se situe sur le site du MIC où le trafic est faible. Les secteurs D et E permettent de différencier le tracé dans les deux directions entre les arrêts MIC, admin et MIC, Labos pour une meilleure compréhension et visualisation des résultats.



Figure 25 - Définition des secteurs

Tableau 4 - Description des secteurs

	Description	Distance dir. MIC	Distance dir. Marly
A	Epinettes	320 m	335 m
B	Route de l'Ancienne Papeterie	355 m	355 m
C	Entrée MIC	130 m	115 m
D	Admin - Labos	125 m	125 m
E	Labos - Admin	215 m	135 m
	Total	1'145 m	1'065 m

La distance en direction du MIC est de 1'145 mètres et de 1'065 mètres en direction de Marly et le temps de parcours selon l'horaire est de 9 minutes avec un temps de battement de 6 minutes à chaque terminus. Ainsi, la vitesse moyenne théorique basée l'horaire est de 7.4 km/h. Il peut donc être constaté que cette vitesse est très proche de la moyenne de 7.3 km/h obtenue entre juin 2020 et mars 2021. Certaines zones du parcours permettent d'accélérer pour atteindre la vitesse programmée maximale de 18 km/h tandis que certains secteurs nécessitent de circuler à vitesse réduite. Il s'agit notamment des carrefours, des zones d'arrêts et de la Route de l'Ancienne Papeterie et sa végétation importante.



Figure 26 - En jaune, secteurs à vitesse réduite

Les vitesses ont été estimées plus précisément pour chaque tronçon et sont indiquées en mètre par seconde sur les deux plans ci-dessous. Elles ont servies de base à l'élaboration des graphiques distance-temps/vitesses.



Figure 27 - Vitesse actuelle estimée en m/s direction MIC



Figure 28 - Vitesse actuelle estimée en m/s direction Marly

Il est observé que, dans les carrefours, la vitesse estimée est de 6.5 km/h et de 8 km/h sur la Route de l'Ancienne Papeterie dans la zone boisée. Des mesures sur les navettes ont permis de déterminer une accélération moyenne de 0.37 m/s². La navette passe de 0 à 18 km/h en 13.5 secondes. Avec ces données et un temps d'arrêt de 20 secondes aux arrêts, il faut 536 secondes soit 9 minutes pour faire le trajet Marly, Epinettes - MIC, Admin - MIC, Labos - MIC, Admin et 461 secondes soit un peu plus de 7.5 minutes pour le trajet MIC, Admin – MIC, Labos – Marly, Epinettes. Ces informations sont cohérentes avec les vitesses moyennes décrites précédemment. Les graphiques ci-dessous indiquent la distance parcourue en fonction du temps et de la vitesse dans chacune des directions en lien avec les différents secteurs.

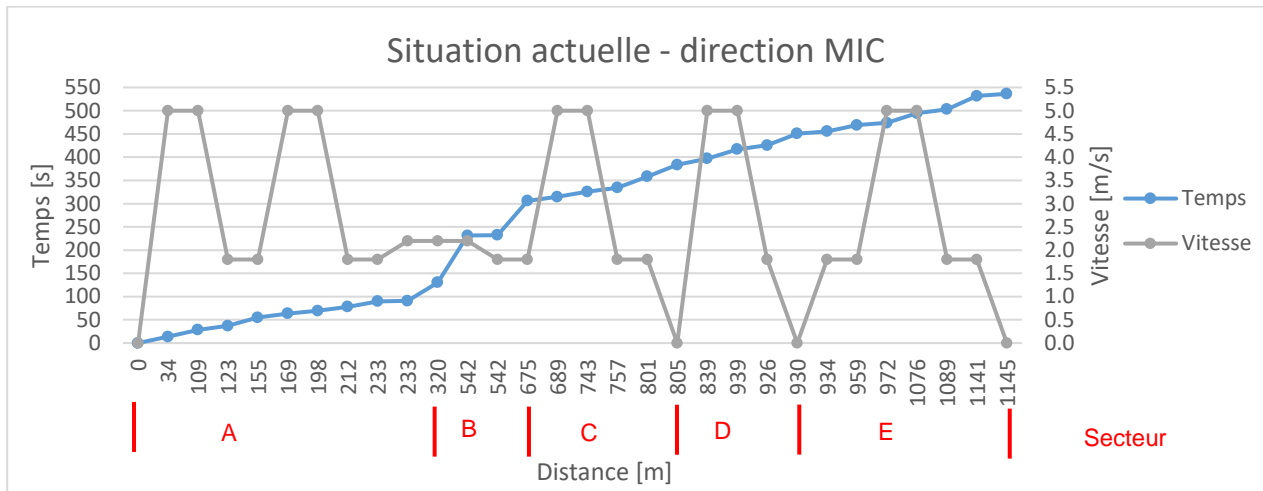


Figure 29 - Graphique distance / temps-vitesse - direction MIC

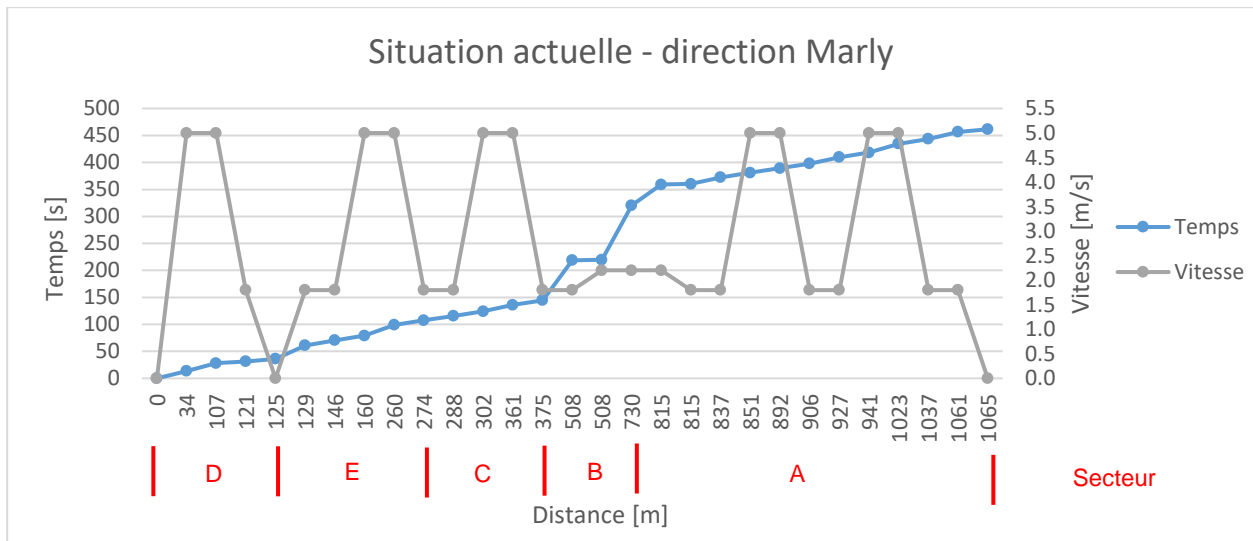


Figure 30 - Graphique distance / temps-vitesse - direction Marly

Pour atteindre une cadence de 7.5 minutes, il est nécessaire d'augmenter les vitesses les plus faibles tout en garantissant un haut niveau de sécurité. Une vitesse plus importante ou du moins une sensation de vitesse plus importante augmentera l'attractivité de la ligne 100 aux yeux de ses utilisateurs et attirera potentiellement de nouveaux passagers. Pour rester réaliste par rapport aux possibilités offertes par la technologie actuelle, il est considéré que la vitesse de programmation maximale demeure de 18 km/h soit 5 m/s. Le tronçon dans la forêt sur la Route de l'Ancienne Papeterie offre une bonne opportunité d'amélioration par sa longueur et sa faible vitesse actuelle. Par exemple, en passant de 2.2 m/s (8 km/h) à 4 m/s (14.4 km/h), il est possible de gagner 46 secondes sur environ 220 mètres. Les figures et graphiques ci-dessous donnent des détails sur les nouvelles vitesses projetées sur chaque secteur.



Figure 31 - Vitesse projetée en rouge en m/s direction MIC

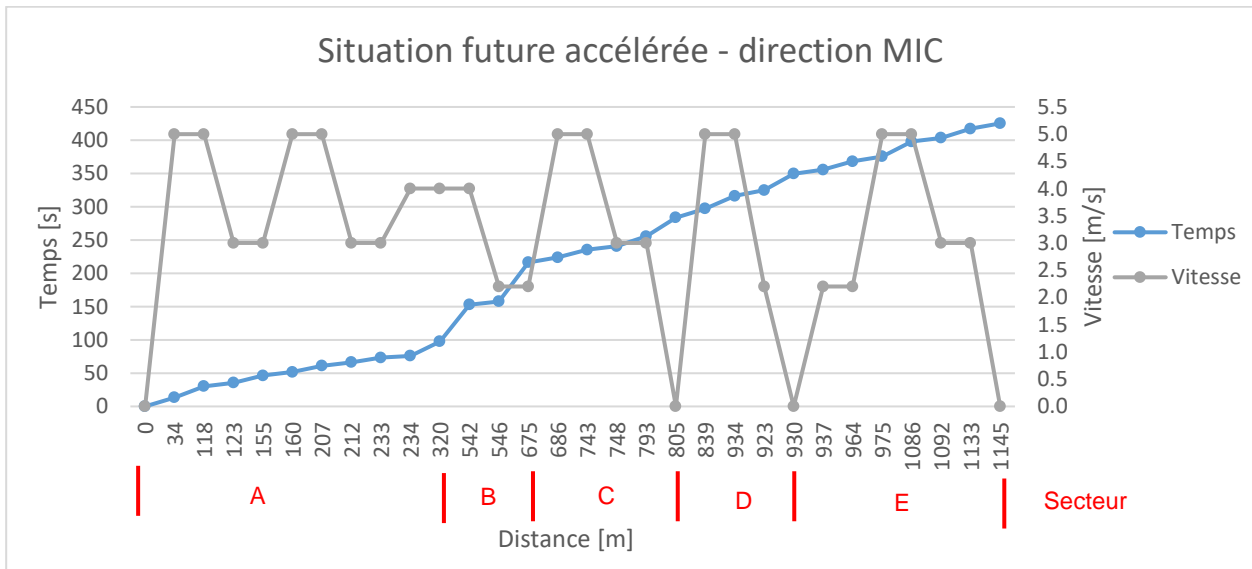


Figure 32 - Graphique distance / temps-vitesse projetée - direction MIC

En direction du MIC avec les nouvelles vitesses définies et représentées sur la figure précédente, le temps de parcours atteint 425 secondes soit 7 minutes. L'amélioration est de 111 secondes, soit 1.85 minute. Ensuite, la même analyse a été effectuée pour la seconde direction.



Figure 33 - Vitesse projetée en rouge en m/s direction Marly

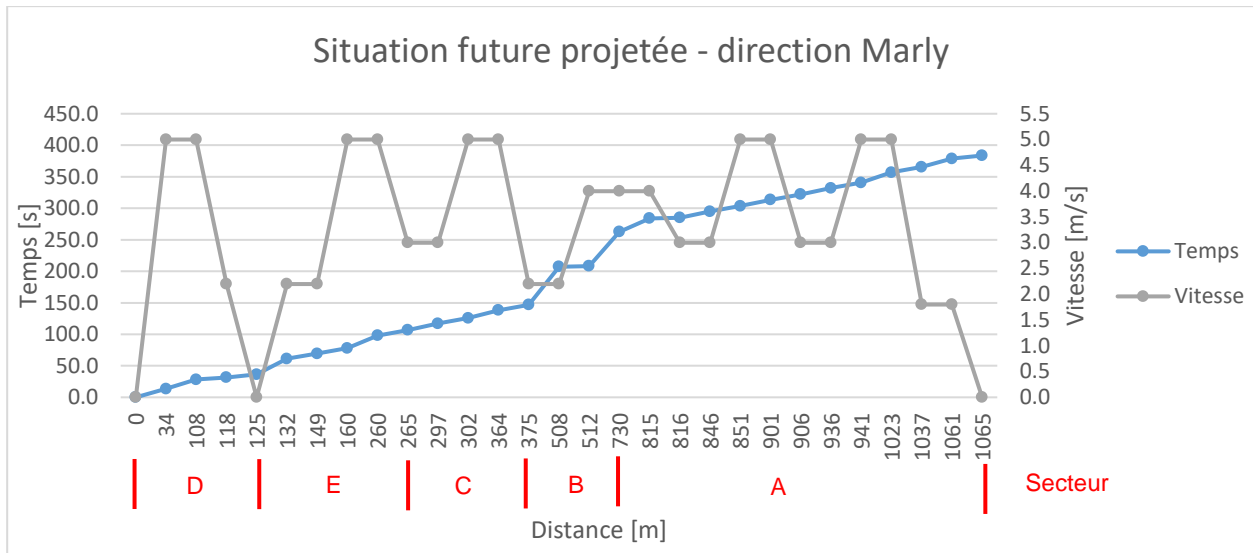


Figure 34 - Graphique distance / temps-vitesse projetée - direction Marly

En direction de Marly, avec les nouvelles vitesses, le parcours peut être effectué en 6.4 minutes. Pour garantir une cadence de 15 minutes, seul 1.6 minutes pour un aller-retour serait disponible comme temps de battement aux terminus. Avec moins d'une minute par terminus, ce temps est beaucoup trop faible tant que des grooms sont obligatoires dans les navettes. Pour garantir de bonnes conditions de travail, les grooms doivent avoir la possibilité de faire quelques pas ou d'aller aux toilettes par exemple durant ces temps de battement. Ces derniers permettent également de rattraper d'éventuels retards sur l'horaire. Des temps aussi faibles ne sont pas non plus envisageables lorsque les véhicules circuleront parfaitement seuls car au moindre imprévu, un retard serait difficilement rattrapable avec si peu de marge. Les navettes sont fortement dépendantes du trafic routier car elles ne circulent pas en site propre. Avec ou sans groom, cette situation n'est clairement pas idéale pour garantir les correspondances avec la ligne 1. Les deux graphiques suivants montrent les différences de vitesses entre la situation initiale actuelle et la vitesse projetée selon les données présentées précédemment dans les deux directions.

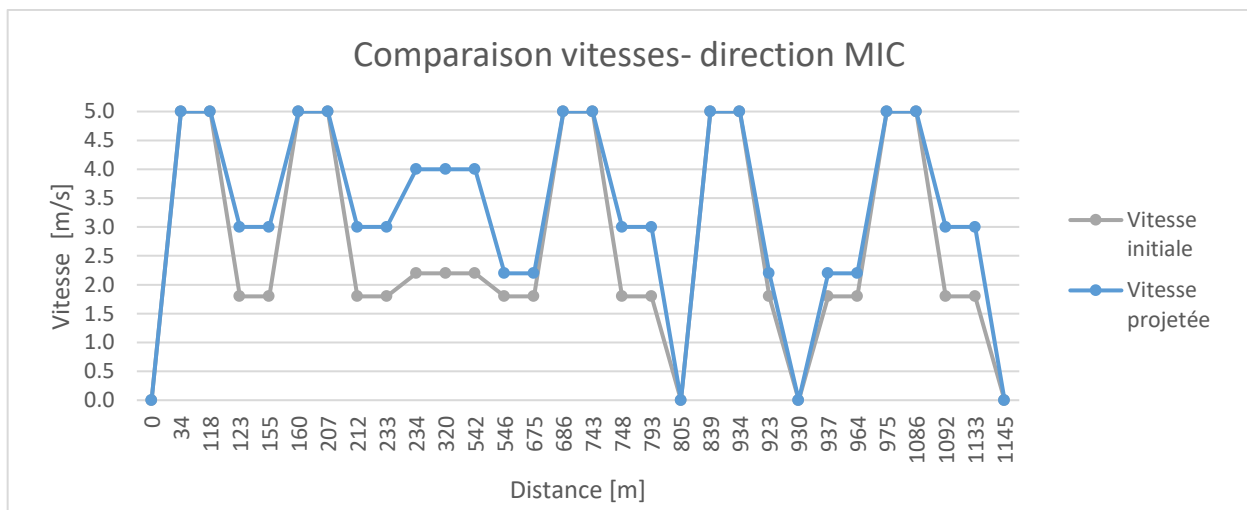


Figure 35 - Comparaison des vitesses actuelles et projetées – direction MIC

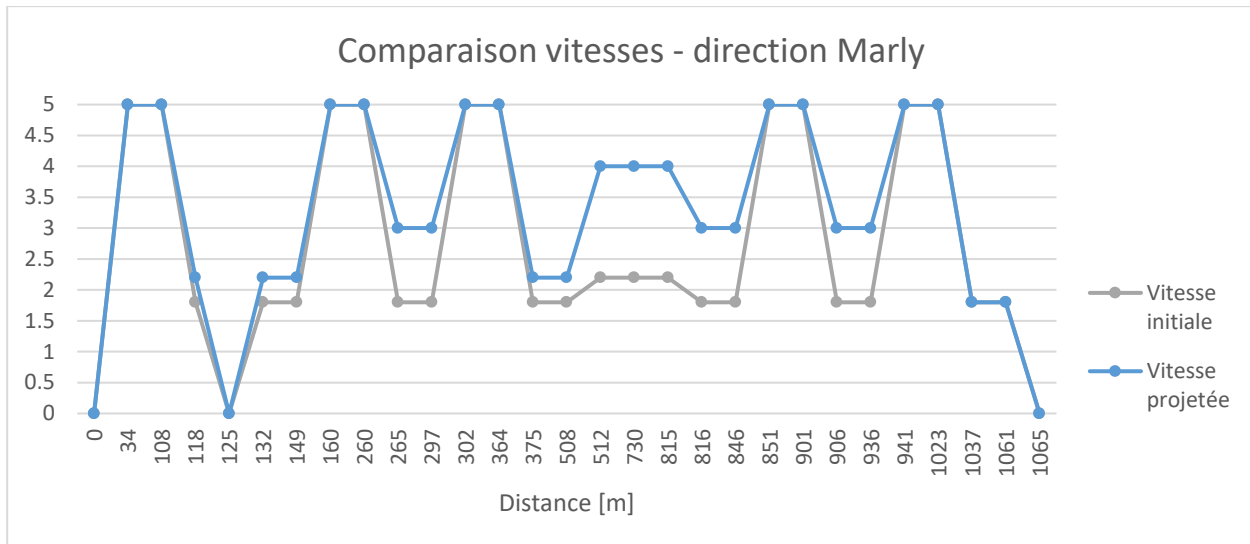


Figure 36 - Comparaison des vitesses actuelles et projetées – direction Marly

Une vitesse de 14.4 km/h dans la forêt paraît actuellement très difficile à mettre en œuvre à cause de la végétation très changeante. Les navettes n'arrivent pas s'adapter à cette problématique dans l'état actuel de la technologie. La sécurité des passagers ne pourrait pas être garantie de manière satisfaisante pour les TPF. Pour remédier à cette situation, des points fixes comme des panneaux ainsi que des glissières de sécurité permettraient potentiellement d'augmenter la vitesse mais cela nécessite d'importants investissements financiers. De plus, des piétons et vélos empruntent cette route d'accès et l'installation d'objets fixes impacterait négativement leur sécurité. Une augmentation raisonnable des vitesses dans les carrefours et une amélioration de la réactivité des navettes ne sont malheureusement pas suffisantes à ce stade pour atteindre la cadence de 7.5 minutes en toute sécurité. Suite à cette analyse et ne pouvant pas garantir un niveau de sécurité élevé respectant les exigences des TPF, la situation actuelle a donc été conservée.

5.7. Projet Téléopération

Pour rappel, le projet sur la téléopération est étudié dans le cadre de l'initiative Swissmoves et le centre ROSAS en est le principal auteur. Le centre ROSAS (RObust and SAfe Systems) de Fribourg fonctionne comme un centre de compétence dans le domaine de la sécurité fonctionnelle, de la cybersécurité, de l'ingénierie des systèmes basée sur des modèles (MBE) et de l'ingénierie de la fiabilité. Ce centre est financé par cinq entreprises industrielles et est un centre de compétence de l'institut des systèmes intelligents et sécurisés (iSiS) intégré à la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR).

Dans le cadre de ce projet, la notion de téléopération est définie comme l'action de pouvoir contrôler à distance de manière sûre dans un centre de contrôle des véhicules entièrement ou partiellement automatisés par un téléopérateur. Ce dernier peut prendre le contrôle à distance du véhicule pour effectuer des manœuvres dans le cas où le véhicule ne peut pas gérer seul une situation problématique. Le projet comprend 6 workpackages et est désormais terminé. Les résultats définitifs sont brièvement résumés dans les chapitres suivants. Pour l'obtention d'informations complémentaires, l'équipe de Swissmoves (<https://swissmoves.ch/>) et les TPF se tiennent à disposition.

5.7.1. Activités par Workpackages

WP1 - Analyse de rentabilité et acceptabilité sociale de la téléopération pour une plateforme de mobilité de type MaaS

Analyse de la rentabilité économique

Actuellement, plusieurs sociétés développent des systèmes de téléopération, telles que Waymo (Google), Cruise (General Motors), Nu-tonomy, Zoox, Drive.ai, Uber et Nissan. Des start-ups font également leur entrée sur le marché, comme Designated Driver aux États-Unis ou Ottopia à San Francisco et Tel Aviv, ou encore Voysys ou Phantom Auto. Cependant, dans ce domaine encore émergent, peu d'informations sont disponibles sur les stratégies adoptées, les retours sur investissements ou les risques perçus.

Grâce aux informations disponibles auprès des partenaires (TPF, CFF et CarPostal), il a été possible de collecter des données sur les coûts actuels des navettes automatisées. Par ailleurs, une revue de la littérature a été réalisée au moyen d'un benchmarking des prestataires de téléopération :

- **Fournisseurs** : RoboAuto, Voysys, Ottopia, AppliedAutonomy, ImperiumDrive
- **Critères de référence** : techniques, économiques, sociaux, projections
- **Collecte d'informations auprès des fournisseurs** : informations et exigences concernant l'effort et les coûts d'intégration / informations sur les projets, les pilotes et les études de cas / les coûts du matériel et des logiciels, y compris les licences d'exploitation / les coûts de maintenance

Concernant la mise en œuvre de la téléopération, différents moyens ont été utilisés pour produire un outil au format Excel visant à mettre en évidence la viabilité économique de la téléopération. L'outil a été conçu pour être pratique et ciblé pour les partenaires du projet, afin qu'ils puissent l'utiliser pour vérifier si l'intégration de la téléopération sur leur navette automatisée serait économiquement avantageuse. Cependant, certaines données varient selon chaque partenaire, par exemple le prix d'acquisition de la navette, le nombre d'heures effectuées par les grooms, le Business Case de Téléopération et le nombre de navettes. Ainsi, l'outil propose des champs libres à renseigner en fonction des données spécifiques de chaque partenaire. Les données de base utilisées pour les calculs sont issues du coût moyen des opérations de navettes auprès de CFF, PostAuto et TPF. Une fois les données saisies, l'outil calcule automatiquement les coûts des navettes opérées par un groom et les coûts des navettes assistées par téléopération (remplaçant un groom) sur un horizon de cinq ans. Puis, ces deux résultats sont comparés afin d'obtenir la solution la plus avantageuse pour les opérateurs. Ceci est illustré par des graphiques générés automatiquement en fonction des calculs dont un exemple est illustré ci-dessous.

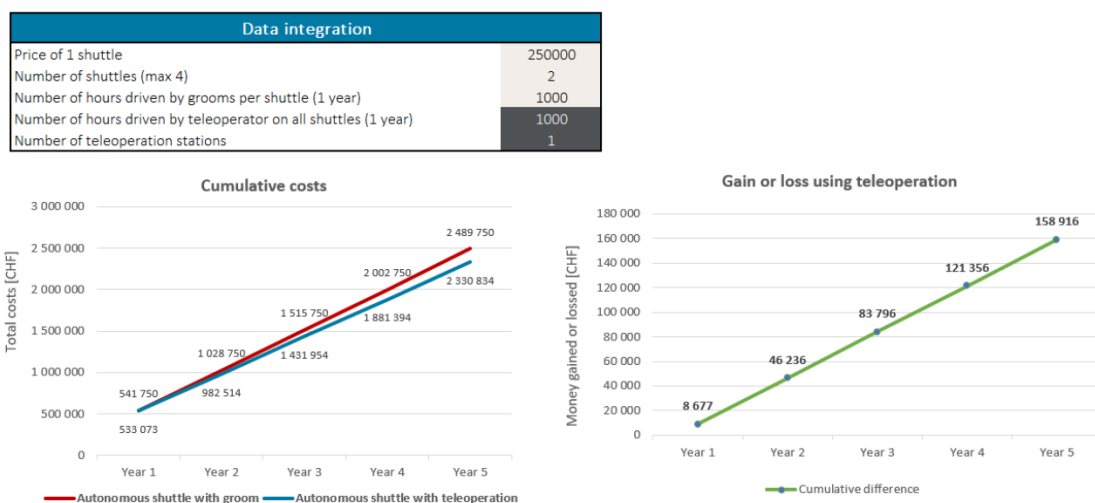


Figure 37 - Exemple de résultats du calcul de viabilité économique de la téléopération

Cette étude a démontré la pertinence d'utiliser la téléopération sur des navettes automatisées. En effet, sa mise en œuvre permet de réduire les coûts de plus de 3 % dès la première année d'application, et jusqu'à 15 % après 5 ans. Nous tenons à souligner que cette étude n'intègre pas la téléopération sur des bus classiques, mais uniquement sur des navettes automatisées récentes. Ces résultats étant basés sur un ratio conservateur de 1 téléopérateur pour 2 navettes, les impacts de la téléopération seront considérables à moyen terme, une fois que la technologie permettra de faire croître ce ratio.

Analyse de l'acceptance sociale – plan méthodologique

Phase 1 (recherche et consultation préliminaire)

Il s'agit tout d'abord de comprendre le contexte dans lequel l'entreprise souhaite mettre en œuvre son projet et engager un dialogue avec les parties prenantes. Il est nécessaire de déterminer si le projet va à l'encontre des valeurs ou des préoccupations de la communauté. Par conséquent, il est important de déterminer qui sont les parties prenantes et quels sont leurs intérêts et leurs préoccupations.

Les valeurs de l'environnement peuvent inclure les éléments suivants :

- Les ressources naturelles dont dépend la communauté
- L'activité économique générée par les activités d'exploitation dont dépend la collectivité
- Le développement économique
- Le développement durable, protection de l'environnement
- Les coutumes locales
- La santé, sécurité et qualité de vie

En amont du projet, l'entreprise doit démontrer son ouverture à concevoir et modifier le projet afin de répondre aux besoins des parties prenantes. L'entreprise doit pouvoir expliquer ses objectifs et fournir un maximum d'informations pertinentes pour son projet (statistiques sur le secteur, sur d'autres projets similaires, références concernant les technologies utilisées, avantages, limites et enjeux du marché). Un plan de communication est donc inévitable.

Phase 2 (information, évaluation et consultation)

Avec la contribution de la communauté tout au long du processus de consultation, le projet bénéficiera d'une évaluation et d'une communication aux parties prenantes des impacts positifs et négatifs potentiels (y compris les coûts) du projet. L'identification des valeurs et des attentes des parties prenantes déterminera l'importance que les parties accorderont aux différents impacts. Par le biais d'un processus de consultation des parties prenantes, l'entreprise devrait être en mesure d'explicitier plusieurs éléments :

- Les objectifs de la consultation
- Les éléments du projet qui font l'objet d'une consultation et qui sont susceptibles d'évoluer
- Les étapes prévues y compris le processus de prises de décision
- Les délais
- Les engagements pris dans le processus

Débuts d'une étude sur l'acceptabilité sociale de la téléopération en mobilité

Il est nécessaire de s'interroger sur les manières de faire et de penser des usagers dans des contextes spécifiques pour parvenir à une appropriation (dernier niveau d'acceptabilité sociale). Il existe deux approches d'appropriation :

Appropriation collective

Afin d'aborder cette notion de propriété collective, six contextes ont été identifiés dans ce projet de téléopération : politique/économique, législatif, usager/organisation sociale, industriel, institutionnel et interinstitutionnel. Chaque contexte a été appliqué à ce projet de téléopération.

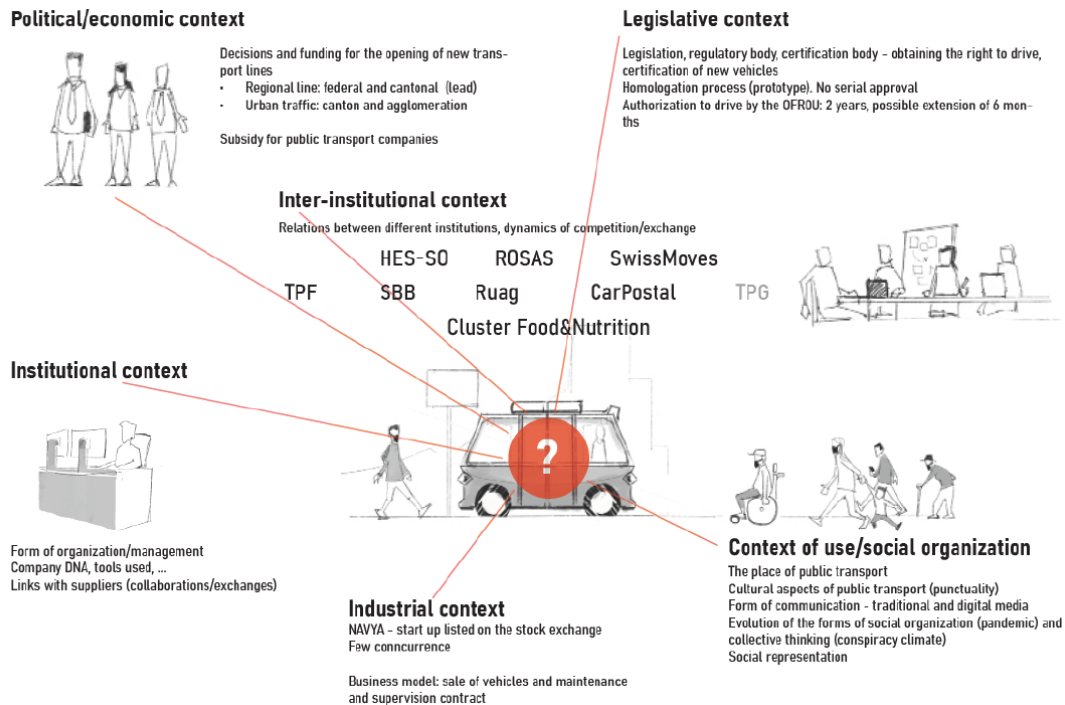


Figure 38 - Appropriation collective (six contextes identifiés) (Source : HEIA-FR)

Appropriation individuelle

Afin de mettre en évidence les critères d'appropriation individuelle, le modèle de Nielsen (1993) a été utilisé. Ce dernier distingue l'acceptabilité sociale/collective et l'acceptabilité pratique (coût, compatibilité, fiabilité et utilité).

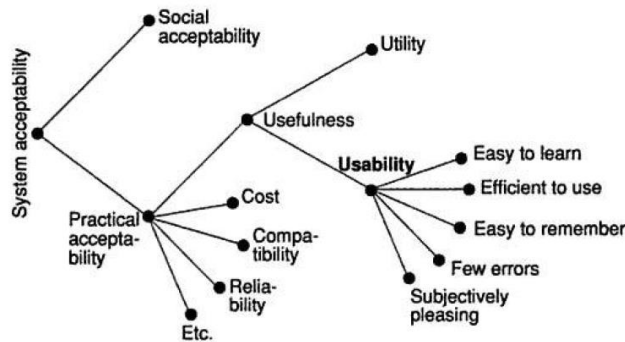


Figure 39 - Acceptabilité selon Nielsen (1993)

WP2 - Développement du système de téléopération au niveau conceptuel

Dans ce workpackage, la sécurité fonctionnelle a été analysée et des analyses sur les risques, la sûreté et la cybersécurité ont également été réalisées en suivant les normes ISO 26262 et 21434. L'architecture préliminaire de la téléopération a permis de définir tous les risques à considérer ainsi que les niveaux de sécurité requis afin de rendre le plus sûr possible le système de téléopération. De plus, une preuve de concept (Proof-of-Concept / POC) a été réalisée grâce à un démonstrateur pouvant être conduit à distance par un téléopérateur. Le prototype de ce système d'exploitation à distance servira également de base à de futurs développements et tests. Ce concept est principalement composé de 3 éléments :

1. Le véhicule
2. Le centre d'opérations
3. L'infrastructure de communication

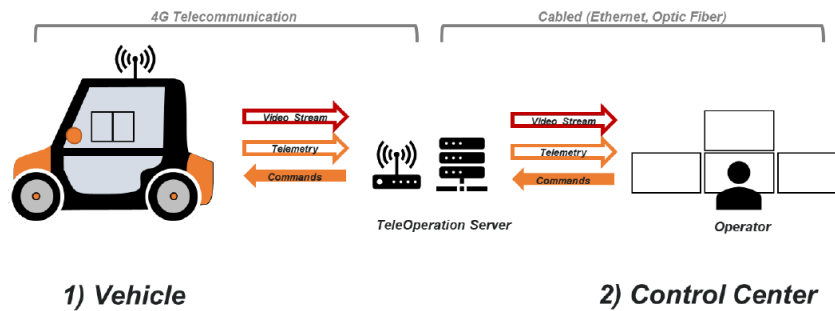
3) *Communication infrastructure*

Figure 40 - Eléments du POC (Source : HEIA-FR)

Pour permettre le fonctionnement du système, au moins un téléopérateur (humain avec permis de conduire) est nécessaire. De plus, pour garantir un fonctionnement totalement sûr et pour éviter tout risque supplémentaire lors des tests, un groom est nécessaire. Le rôle du groom est de reprendre physiquement la téléopération dans l'éventualité où une conduite sécuritaire du véhicule n'est plus assurée (par exemple en cas de panne critique du système de téléopération). Lors des tests effectués jusqu'à présent, le groom n'a jamais eu à reprendre l'opération.

Le véhicule utilisé pour ce POC est le « PerceptIn DragonFly pod », un véhicule léger électrique avec la fonction « drive by wire ». Cette caractéristique est cruciale pour permettre au véhicule d'effectuer des fonctions avec des systèmes électromécaniques au lieu de systèmes mécaniques purs nécessitant la présence d'un humain à bord. Les principales fonctions utilisées sont les suivantes :

- Appliquer/relâcher le frein de stationnement
- Définir un angle de volant spécifié
- Définir une vitesse de véhicule spécifiée
- Définir une force de freinage spécifiée
- Allumer/éteindre les feux de virage (gauche/droite)
- Allumer/éteindre les voyants
- Allumer/éteindre les feux de route
- Activer/arrêter le klaxon



Figure 41 - Démonstrateur PerceptIn et Navette Navya (Source : TPF)

Le véhicule est capable de collecter des données comme la vitesse des roues (vidéo de la caméra incluse), de les transmettre, grâce à l'infrastructure de communication, à l'utilisateur final (opérateur à distance) et d'interpréter la commande reçue. Outre les caractéristiques principales de la téléopération, le véhicule est capable de percevoir ce qui l'entoure avec des radars, des sonars et des caméras et de se localiser avec le GNSS/GPS pour finalement conduire, dans certaines conditions, automatiquement puisque le véhicule peut être considéré de niveau d'automatisation 3 (conditionnellement automatisé) ou de niveau 4 (hautement automatisé).

Le rôle du centre d'opérations est de communiquer physiquement avec l'opérateur humain et vice-versa. Les éléments qui composent le centre sont les suivants :

- Volant
- Pédale de frein
- Pédale d'accélérateur
- Levier de vitesses (drive, neutre, marche arrière)
- Souris et clavier
- Ordinateur et écrans
- Tablette

Le système de conduite utilisé est un Logitech G29. Une souris et un clavier permettent à l'opérateur de s'authentifier et de se connecter au véhicule via l'interface web hébergée par le serveur. L'interface Web de l'ordinateur collecte les données du système de conduite, reçoit et affiche les mesures du véhicule telles que la vitesse et l'état du frein de stationnement (sur tablette) et affiche les images de la caméra à l'écran. La figure ci-dessous montre l'état actuel de notre centre d'opérations :



Figure 42 - Centre de contrôle de la téléopération (Source : HEIA-FR)

Développement et validation des éléments sous l'aspect de la sécurité fonctionnelle et de la sécurité

Sécurité selon ISO 26262

Cette architecture présente les éléments du sous-système directement liés à la téléopération, ainsi que les relations entre ces éléments (flux et commandes). Ces éléments sont divisés en 2 sous-ensembles : le véhicule autonome (AV) et Centre d'opérations.

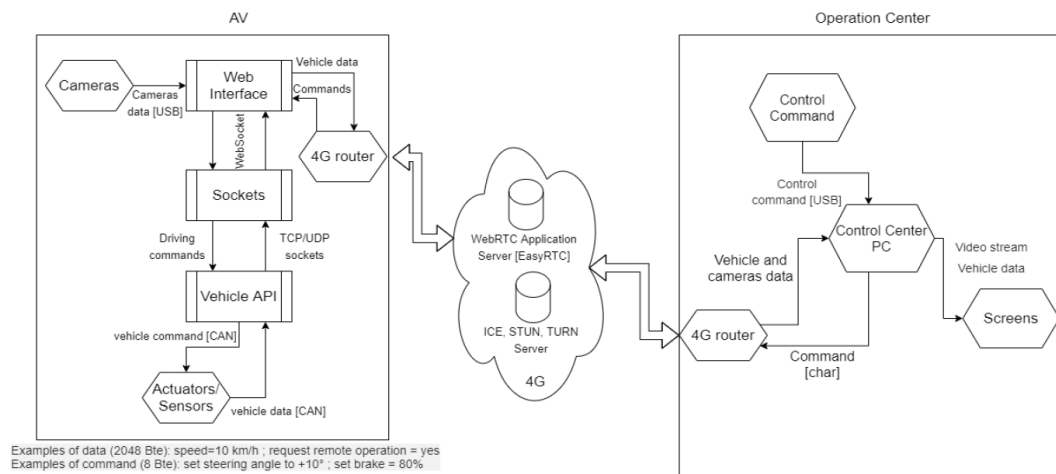


Figure 43 - Architecture préliminaire de la téléopération

Pour chaque fonction du véhicule autonome, une analyse de risque a été effectuée puis les risques identifiés et classés selon les standards ASIL (Automotive Safety Integrity Level). Cette classification permet de définir les exigences de sécurité nécessaires pour être en conformité avec la norme ISO 26262. L'ASIL est établi en effectuant une analyse des risques d'un danger en examinant la gravité, l'exposition et la contrôlabilité du scénario de fonctionnement du véhicule. Des objectifs de sécurité (Safety Goals) sont ensuite définis. L'objectif du projet étant d'élaborer une preuve de concept de téléopération, les objectifs de sécurité ont été définis uniquement pour cet élément. Deux Safety Goals ont été définis pour la partie Téléopération :

ID	Function	ASIL	Safety Goal	Safe State
Func21	Process teleoperation commands	D	Ensure that teleoperation driving commands can be totally process in teleoperation mode	Activation of the AV emergency braking
Func42	Teleoperation needed	D	Ensure that the AV can request teleoperation when needed	Activation of the AV emergency braking

Figure 44 - Safety Goals et Safe State

Deux types d'exigences ont été définies pour ce projet :

- **Exigences fonctionnelles** : Ces exigences ont été définies à l'aide des schémas fonctionnels. Ils permettent d'identifier, à haut niveau, les fonctions à mettre en œuvre pour la localisation, le Path Planning, la Perception et la Téléopération.
- **Exigences de sécurité fonctionnelle** : À la suite de l'analyse de la sécurité, des exigences de sécurité basées sur la norme ISO 26262 ont été définies. Ces exigences permettent d'identifier les mesures de sécurité à mettre en œuvre afin d'éviter les dangers définis dans l'analyse des risques. Les détails de ces éléments se trouvent dans le rapport complet.

La cybersécurité selon la norme ISO 21434 a également été analysée dans le cadre de ce workpackage.

Model-Based Engineering (MBSE)

Le WP2 concerne le développement et la validation d'exigences de sécurité et de fiabilité pour assurer la sécurité du véhicule pendant son mode de téléopération. Un modèle MBSE a été créé et rassemble toutes les informations concernant ses systèmes, ses comportements, ses exigences. Il est un outil puissant pour mieux comprendre un système, aidant ainsi à relier les exigences aux éléments qu'il affecte. Les buts du MBSE sont :

- Concevoir un modèle contenant les cas d'utilisation et le comportement du système.
- Dédire les exigences de haut niveau à l'aide du modèle en cours.

La première étape de la conception du système consiste à consigner l'ensemble des besoins des parties prenantes et, à l'aide d'un ou plusieurs cas d'usage, de définir les fonctions du système et son interaction avec les acteurs externes (acteur est un terme très générique qui peut être utilisé pour d'autres systèmes, utilisateurs, environnement comme la température, le temps, l'humidité par exemple). Pour y parvenir, 7 ingénieurs se sont réunis pour définir, réfléchir et discuter des objectifs du système et de la manière dont ils pourraient être atteints.

WP3 - Développement et intégration des fonctions de sécurité automatisées nécessaires à la téléopération avec le démonstrateur

Localisation

Des algorithmes ont été développés pour générer en temps réel une carte autour du véhicule permettant de le localiser. L'utilisation de différents capteurs crée de minuscules erreurs qu'il y a lieu de corriger avec d'autres algorithmes et de la géolocalisation par un récepteur GNSS. Les expériences réalisées montrent que notre méthode améliore la précision de la solution d'origine

et se comporte bien par rapport à d'autres méthodes utilisant la géolocalisation. Comme notre méthode repose sur une solution visuelle-inertielle déjà robuste, elle fonctionne même pendant une courte période de perte de signal GNSS, la rendant suffisamment robuste pour être utilisée dans une application réelle comme un véhicule autonome. Une vidéo montrant les résultats obtenus peut être consultée sur Internet : <https://youtu.be/bvuesYHef3o>

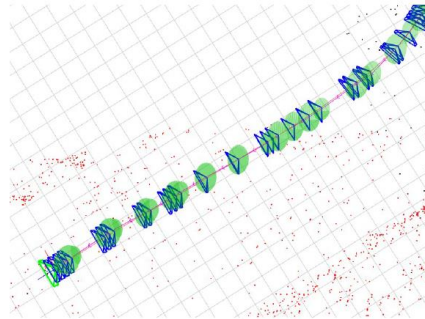


Figure 45 - Vue du dessus des mesures pour la localisation (Source : HEIA-FR)

Perception

L'objectif de cette partie est la recherche et le développement de différents algorithmes pouvant être utilisés pour détecter des objets dans l'environnement autour du véhicule autonome. L'objectif principal est la détection des véhicules et des piétons à l'aide de caméras (couleur et thermique), mais une réflexion est également faite sur la perception à l'aide d'autres capteurs comme la technologie RADAR. Une fois la fusion effectuée avec succès sur l'ensemble de données, il a été remarqué que les images couleurs et thermiques sont légèrement désynchronisées. Cette erreur de synchronisation a dû être corrigée.

La figure ci-dessous montre une comparaison côte à côte des images couleurs et thermiques. En principe, cet ensemble de données semble prometteur, mais certains problèmes ont été découverts et rendent cet ensemble de données pas idéal pour nos besoins car tous les éléments n'ont pas été identifiés.



Figure 46 - Images couleurs et thermiques (Source : HEIA-FR)

La liste ci-dessous mentionne le capteur et son utilisation générale dans un véhicule autonome.

- Unité de mesure inertielle (IMU)
 - Orientation et accélération du véhicule
- RADAR
 - Détection d'objets autour du véhicule, freinage d'urgence automatique
- GNSS/GPS
 - Localisation globale du véhicule
- LIDAR
 - Carte 3D de l'environnement des véhicules environnants
- Capteur à ultrasons
 - Détection d'objets très proches autour du véhicule

Ces capteurs pourraient potentiellement être utilisés sur un véhicule autonome mais dans ce projet, les LIDAR ne seront pas utilisés. La raison est double : d'une part les LIDAR sont très chers ; d'autre part, les LIDAR ne fonctionnent pas bien dans certaines conditions d'éclairage. Ces deux raisons réunies nous amènent à conclure que les LIDAR ne sont pas une solution viable pour ce projet. Les RADAR, quant à eux, sont très utiles pour plusieurs raisons : ils constituent une technologie éprouvée sur les véhicules routiers ; ils sont pour la plupart insensibles à la météo ; les prix sont beaucoup plus bas par rapport aux LIDAR.

Quelques vidéos ont été élaborées afin de montrer les algorithmes développés :

- Thermal pose detection: <https://youtu.be/-8r5ne6k0c8>
- RGB pose detection: <https://youtu.be/TxTKw1Pg9yE>
- Object detection: <https://youtu.be/YH8mfmiGDVQ>
- Line detection: <https://youtu.be/FJOck5XrhuA>

Path planning

Cette partie du projet vise à développer un module de contrôle de trajectoire et de mouvement d'un véhicule autonome. L'idée est d'acquérir suffisamment de connaissances techniques et technologiques du module d'aide à la décision contrôlant le comportement du véhicule. Les connaissances acquises seront alors d'une importance cruciale pour estimer dans quelle situation le téléopérateur prendra le contrôle du véhicule. Le projet est plus axé sur l'aspect logiciel, ceci en raison des ressources limitées. Il est clair que le hardware jouera un rôle principal pour les performances du véhicule, pour cette raison le véhicule sera divisé en plusieurs modules.

Le processus de pré-cartographie est effectué avant le mode opératoire et consiste en la réalisation d'une carte physique et d'une carte de segmentation. La carte physique est développée à l'aide d'AutoCAD, et elle respecte les normes routières suisses pour la géométrie de la signalisation. Le Marly Innovation Center a été utilisé comme exemple pour le développement du path planning.



Figure 47 - Carte physique du MIC (Source : HEIA-FR)

La carte de segmentation est ensuite développée avec Java OpenStreet Map Editor (JOSM).

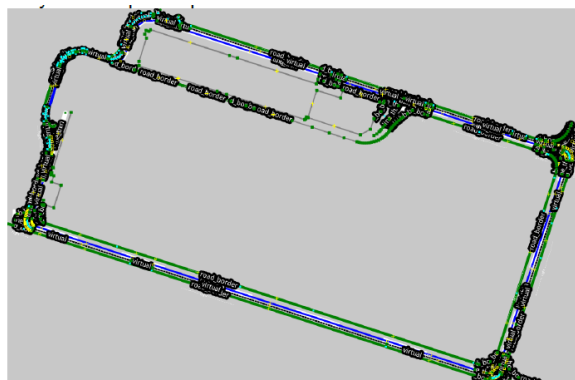


Figure 48 - Carte de segmentation du MIC (Source : HEIA-FR)

Sur la figure précédente, il est possible d'observer que chaque ligne est classée avec au moins un objet de circulation, comme les bordures de route, les intersections, la signalisation d'arrêt, etc. La carte est réalisée en respectant la structure Lanelet2. Lanelet2 est une bibliothèque très puissante qui permet non seulement de lire des informations routières, mais aussi de sélectionner un chemin optimal en fonction de différentes variables.

Si la position actuelle du véhicule est connue, la première étape est de savoir dans quelles Lanelets se situent les points de départ et d'arrivée. Ceci est réalisé à l'aide d'un analyseur de carte. Une fois cette opération réalisée, il est possible d'effectuer l'algorithme de "path finding". La figure suivante montre comment à partir d'une carte HD complexe, il est possible d'extraire des informations routières uniquement sur le chemin concerné.

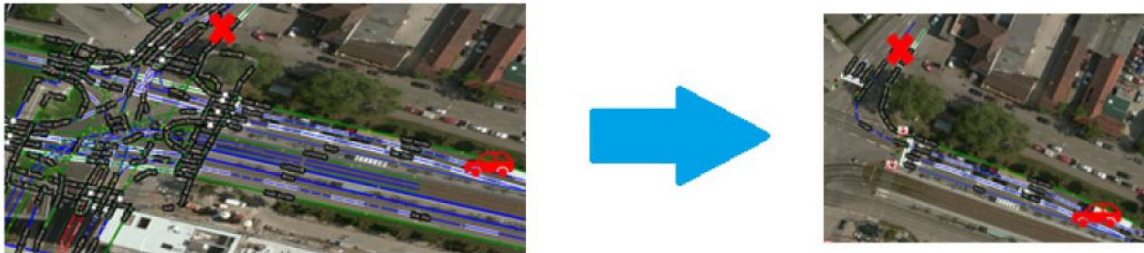


Figure 49 - Algorithmes de "Path Finding" (Source : HEIA-FR)

Cette vidéo montre la procédure utilisée pour la simulation du Path Planning :

<https://youtu.be/tqu1TQik8Uk>

WP4 - Réglage et configuration du châssis et de la carrosserie

Le véhicule PerceptIn ne répondant pas aux exigences minimales pour la certification L6 / L7, une plate-forme construite par la société PIXMOVING a été achetée. Ce châssis est spécialement développé pour les véhicules autonomes. Il intègre tous les composants nécessaires au pilotage et dispose de multiples points de montage pour fixer la structure du prototype.

Feature	Value
Size	2516x1546x616mm
Wheelbase	1900mm
Wheeltrack	1355mm
Ground clearance	200mm
Chassis weight	470kg
Maximum load	800kg
Maximum speed	40km/h
Maximum gradeability	20%
Steering type	Four-wheel steering
Maximum turning radius	3m
Driving mileage	120km
Battery capacity	11kWh
Power	16kW (4 x 4kW)



Figure 50 - Caractéristiques du PIXLOOP et Figure 51 - Plateforme PIXLOOP (Source : HEIA-FR)

En collaboration avec la société Dynamic Test Center, qui est l'un des partenaires du projet, nous avons évalué l'homologation de ce châssis et voici l'état d'avancement :

- La catégorie de véhicule L6e-BU n'est pas réalisable avec la plateforme PixLoop, principalement à cause de la puissance. La puissance maximale pour la catégorie L6e-BU est de 6 kW, soit 1,5 kW par roue.
- Pour la catégorie de véhicule L7e-CU, il suffit de réduire la puissance de 1 kW à 15 kW, soit 0,25 kW par roue.
- Avec les réglementations européennes d'homologation actuellement en vigueur, un véhicule routier sans conducteur ne peut pas être homologué. La possibilité de dérogations aux réglementations existantes pour les nouvelles technologies ou concepts mentionnés à l'art. 40 du règlement (UE) 168/2013 exige l'application de l'autorisation de la Commission européenne. Cela nécessite, entre autres, des tests pour prouver que les exigences de sécurité et de protection de l'environnement sont respectées au moins dans la même mesure qu'avec les technologies conventionnelles. Tant que la Commission européenne ne donne pas son approbation, les approbations de type UE peuvent être

délivrées au niveau national, mais elles ne sont valables que sur le territoire du pays concerné. Et cela nous amène à l'agrément suisse et aux règles de l'OETV. Ceux-ci sont généralement compatibles avec ceux de l'UE, et pour la catégorie L7e-CU en particulier les dimensions sont plus généreuses.

- L'objectif est de suivre ces règles pour le(s) véhicule(s) du projet en cours. L'OFROU peut également accorder des dérogations aux règles d'homologation en vigueur pour les nouvelles technologies.

Cette vidéo montre la première prise en main du véhicule à l'aide d'un système de radiocommande : <https://youtu.be/j1MxGrF5bGc>

WP5 - Vérification et validation

Dans le cadre de cette analyse, l'objectif est de valider un Functional Safety Requirement (FSR) à travers une évaluation de modèle. En effet, différents modes de défaillance, respectivement mécanismes de sécurité, seront dérivés du FSR sélectionné et implémentés dans le modèle du système. Cette validation sera réalisée en utilisant l'outil de simulation Cameo System Modeler et SysML. La deuxième phase de l'application de la méthode par modèle est consacrée à la validation des exigences de sécurité fonctionnelle (FSR) liées au système de véhicule téléopéré. Comme au début de chaque processus de modélisation, une base de données solide et complète doit être disponible. Cette base de données est utilisée comme entrée pour la conception du modèle système et du contexte de test. Dans le cas de la validation FSR, plusieurs documents ou données sont nécessaires :

- L'évaluation des dangers et des risques : Elle répertorie les exigences fonctionnelles du système et son FSR associé. Les informations contenues dans ce document servent à préciser les objectifs de l'analyse.
- L'architecture du contexte du système : Elle spécifie les sous-systèmes du système en cours de conception (SUD / System-Under-Design) et leurs relations
- Les modes de défaillance des sous-systèmes et leurs effets sur les sous-systèmes. Ces informations serviront à concevoir les comportements défectueux des sous-systèmes.

Dans cette phase, l'objectif est de démontrer le potentiel des méthodes basées sur des modèles afin de valider le respect d'une exigence de sécurité fonctionnelle dans le cadre du projet de téléopération. Pour cette raison, une seule exigence fonctionnelle a été sélectionnée pour appliquer la méthodologie de modélisation et effectuer l'analyse complète des exigences dont le résultat peut être demandé auprès des TPF ou de Swissmoves.

Cette vidéo montre le processus et la méthode utilisée pour valider les exigences selon l'approche du Model-Based Engineering : <https://youtu.be/sKW5ljEKUZA>

WP6 - Autorisation de l'ensemble du système, y compris le centre de téléopération et le véhicule

Le groupe de projet Téléopération a eu une réunion avec l'OFROU le 20 janvier 2021 concernant les autorisations nécessaires pour la mise en circulation d'un véhicule téléopéré sur la voie publique. Il est apparu qu'il fallait trouver un projet pilote pour réaliser des tests de circulation sur routes mixtes. Une autorisation spéciale sur une certaine période doit être demandée à l'OFROU. Les informations à détailler sont les suivantes :

- Concept d'exploitation
- Concept de fonctionnement
- Concept de sûreté et de sécurité
- Concept de formation
- Certificat d'assurance
- Accord de l'Office cantonal de la circulation
- Accord de la Police cantonale
- Accord du Canton et de la Commune où le test est effectué
- Autorisation OFCOM
- Autorisation OFT (si transport de personnes)

Une liste détaillée des exigences d'homologation pour la catégorie L7 a été élaborée et contient toutes les exigences applicables (plus de 1'000 exigences). Cette source pourrait être utilisée comme document de base pour une mise en œuvre industrielle. De plus, une étude de cas a été réalisée pour la France et l'Allemagne démontrant qu'à partir de 2022, nous pourrions nous attendre à des véhicules sans pilote sur la voie publique :

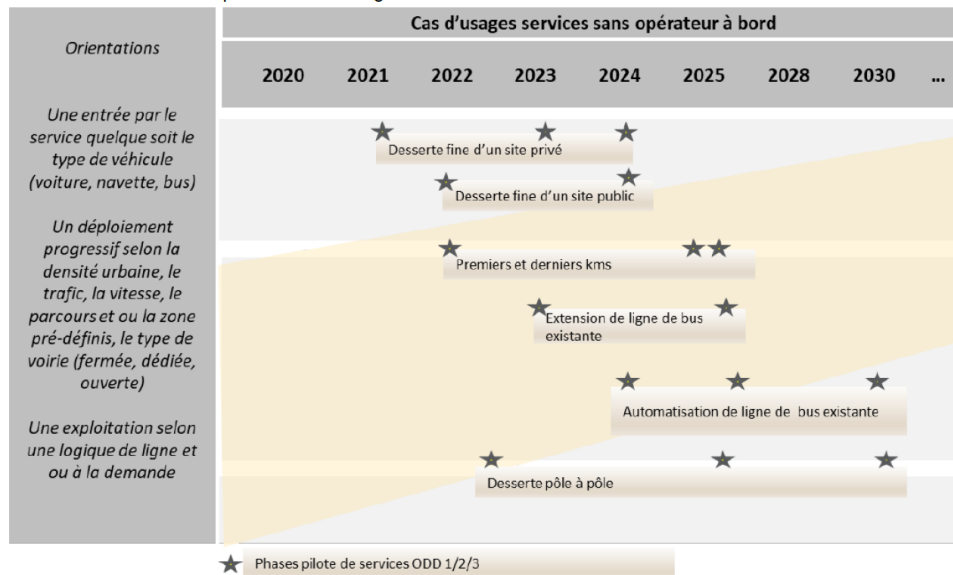


Figure 52 - Planning de déploiement de véhicules autonomes en France

Difficultés rencontrées

Le démonstrateur PerceptIn a rencontré plusieurs difficultés avec ses fonctionnalités pour le rendre autonome. Nous avons eu plusieurs réunions à distance avec les ingénieurs de PerceptIn mais ils n'ont pas pu résoudre les problèmes. Afin d'avancer avec le projet téléopération, nous avons arrêté les discussions avec PerceptIn et intégré notre solution de téléopération sur le véhicule pour le piloter à distance. Il est important de noter que les problèmes rencontrés sont uniquement dus au démonstrateur (système autonome) et non à la téléopération développée. Il existe un grand nombre d'autres véhicules autonomes sur le marché dont les algorithmes pour rendre le véhicule autonome sont plus robustes et notre solution pourrait y être intégrée.

Dans le développement du Proof-of-Concept de téléopération, nous avons détecté un emplacement sur le site blueFACTORY (près des voies ferrées) où le centre de téléopération perd la connexion avec les caméras. Comme le reste du site n'a pas de problème, nous entamerons des discussions avec les opérateurs de réseaux dans les prochains mois pour identifier un moyen de prioriser les paquets de données pour la téléopération. L'utilisation de la 5G à terme pourrait permettre de résoudre ce problème.

L'OFROU n'émet pas d'autorisation sur la preuve de concept comme développée au cours de ce projet. Le résultat des rencontres avec l'OFROU est qu'un projet pilote doit être défini où le véhicule circulera de manière téléopérée pendant une certaine période afin de prouver son fonctionnement sur une voie publique.

Points ouverts

Les algorithmes de perception, de localisation et de path planning ont été développés et entraînés sur des vidéos spécifiques, des vidéos open source et des vidéos entre Fribourg / Marly / Bulle. L'étape suivante consiste à implémenter ces algorithmes sur un démonstrateur (i.e. PixLoop) avec la mise en place de capteurs adéquats (IMU, Caméras, Radar, Sonar, ...).

Le Proof-of-Concept de la téléopération est fonctionnel, la prochaine étape sera de travailler sur la redondance de la transmission des données ainsi que sur la fiabilité. Pour y parvenir, des discussions seront menées avec les fournisseurs d'accès Internet en Suisse. Plusieurs questions restent en suspens :

- Comment prioriser les packages de téléopération ?
- Comment calculer le débit réseau d'un site ou d'une zone où déployer des véhicules téléopérés ?
- Redondance avec plusieurs opérateurs de réseau ou avec un seul ?
- Que faire en cas de problème matériel réseau ?

Les premières analyses du démonstrateur PixLoop ont été réalisées par l'institut SeSi et le Dynamic Test Center. Certains documents (système de direction, système de freinage) doivent être transmis par le constructeur PixMoving afin d'améliorer les analyses. Si elles sont concluantes, la prochaine étape serait de lancer le processus d'homologation auprès de l'OFROU pour la catégorie L6 ou L7. La fonction permettant de passer du mode téléopération au mode autonome et inversement doit être développée. En effet, au vu des problèmes rencontrés avec le démonstrateur PerceptIn, il est préférable d'utiliser un autre démonstrateur pour le développement de cette fonction (navettes autonomes partenaires, démonstrateur PixLoop, véhicules RUAG, ...).

5.7.2. Point de vue des TPF sur la téléopération

Pour les TPF, l'étude sur la téléopération a été très enrichissante et a permis de mieux appréhender les questions liées aux enjeux sociaux et économiques notamment. A terme, le contrôle à distance de véhicules autonomes ou partiellement automatisés sera un élément central pour le développement de la technologie mais aussi pour l'acceptance sociale et la réduction des coûts pour les commanditaires. Il reste toutefois plusieurs questions ouvertes notamment si un centre de téléopération gèrera toute la flotte ou si des plus petits centres seront localisés proches des véhicules exploités afin de pouvoir intervenir sur place physiquement. La centralisation permet une certaine efficacité mais rallonge de manière non-négligeable les éventuels temps d'intervention physique. Un défi sera également de former correctement les téléopérateurs et le personnel qui interviendra sur place. Les tâches des téléopérateurs du futur devront être clairement définies et il serait intéressant d'analyser si les téléopérateurs peuvent de manière raisonnable et sûre gérer des véhicules autonomes et des véhicules non-autonomes parallèlement. La téléopération soulève également de nombreuses questions liées à la définition des responsabilités et des limites de chaque personne et chaque système. Un point critique sera la définition du nombre de véhicules autonomes qu'un téléopérateur pourrait gérer de manière sûre. Un équilibre est à trouver entre la garantie de la sécurité et l'optimisation des coûts. Il est actuellement difficile d'estimer le volume d'interventions à distance et sur place lorsque la technologie de niveau 4 ou 5 sera mature et suffisamment fiable pour être commercialisée et homologuée. Un autre élément important est le contact entre le téléopérateur et les passagers. En cas d'imprévu, les passagers doivent pouvoir obtenir des informations en temps réel sur la situation problématique et sa résolution. L'acceptance sociale des passagers est un point crucial pour déterminer à quel horizon les véhicules autonomes seront déployés à large échelle. Des alternatives et solutions doivent exister pour les personnes les plus réticentes à cette technologie. Dans tous les cas, la téléopération fera partie intégrante des futurs systèmes de mobilité autonomes. Il est donc important de continuer l'acquisition de connaissances sur ce thème et de poursuivre le développement de nouveaux projets. Grâce à ce projet, la HEIA a permis d'apporter une très bonne expertise à réutiliser dans le développement de nouveaux projets en lien avec la mobilité automatisée et autonome.

5.8. Comparaisons entre le monde autonome routier et ferroviaire

Les Transports publics fribourgeois exploitent des bus mais également des trains à voie normale et à voie étroite. Par conséquent, il paraissait intéressant de comparer les véhicules autonomes dans les mondes ferroviaires et routiers afin de se rendre compte des potentielles synergies possibles dans le futur. Tout d'abord, un état de l'art des trains autonomes est présenté permettant de comparer les niveaux d'automatisation et d'évoquer différents exemples dans le monde et en Suisse. Les opportunités et les risques des trains autonomes sont brièvement mentionnés. Ensuite, les véhicules et les trains autonomes sont comparés en considérant la technologie, l'acceptance sociale, les lois et réglementations ainsi que les processus internes propres aux TPF en lien avec le contrôle à distance. Il est intéressant de noter que dans la réglementation suisse, les infrastructures liées aux tramways et trolleybus sont soumises aux mêmes réglementations que les chemins de fer. Ces deux types de véhicules ne sont pas traités dans la présente étude mais une analyse future sur l'automatisation de ces deux types de transport seraient intéressantes.

5.8.1. Etat de l'art des trains autonomes

Selon l'Union internationale des transports publics (UITP), il existe 5 niveaux d'autonomisation des trains qui sont définis avec l'échelle GoA (grade of automation), de GoA 0 à GoA4. Le niveau 0 correspond à un train conduit totalement en marche à vue comme c'est notamment le cas pour les tramways en milieu urbain. Pour le niveau 1, le conducteur contrôle toutes les opérations majeures, c'est-à-dire les démarrages, les arrêts et le contrôle des portes. Le conducteur reste responsable de la sécurité et de la gestion des urgences et imprévus. Le niveau 2 est un train semi-automatique, le conducteur s'occupe encore de la gestion des portes et de la sécurité. Dès le niveau 3, l'opérateur s'occupe du bon fonctionnement du train en ouvrant les portes et en intervenant uniquement en cas d'urgence. Les démarrages et les arrêts sont automatisés. Le niveau 4 ne nécessite plus de personnel à bord du train car ce dernier est totalement autonome et capable de gérer toutes les situations. Il s'agit d'une exploitation sans surveillance (UTO). Il est important de ne pas confondre les notions de trains automatiques et trains autonomes. En effet, les trains automatiques fonctionnent sur des voies propres dans un système totalement fermé et sécurisé avec une forte communication entre le véhicule et les infrastructures. Le métro de Lausanne fait partie de cette catégorie. Les trains autonomes circulent sur des voies partagées avec d'autres types de trains avec lesquels ils doivent communiquer et partager des informations. Les trains autonomes doivent être capables de voir devant et autour d'eux afin de détecter des obstacles ou anomalies. Ils doivent également prendre seul des décisions rapides et sûres.

GRADE OF AUTOMATION	TRAIN OPERATION	SETTING TRAIN IN MOTION	DRIVING AND STOPPING	DOOR CLOSURE	OPERATION IN EVENT OF DISRUPTION
GoA 1	Automatic Train Protection with Driver			Driver	
GoA 2	Automatic Train Protection + Automatic Train Operation with Driver				
GoA 3	Driverless Train Operation	Automatic		Attendant	
GoA 4	Unattended Train Operation				

Figure 53 - Définition des niveaux d'automatisation pour les trains (Source : Alstom)

Il peut être constaté que l'échelle GoA est très similaire à l'échelle des niveaux d'automatisation pour les véhicules routiers illustrée ci-dessous :

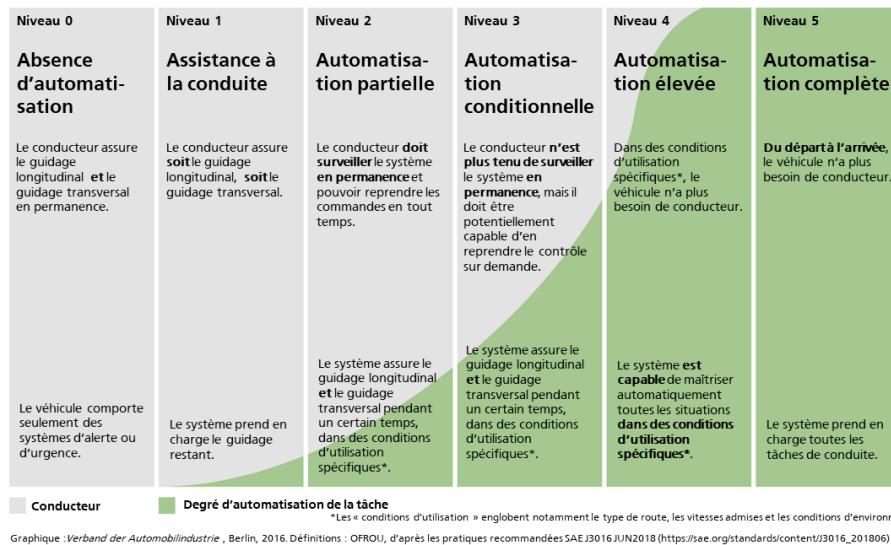


Figure 54 - Définition des niveaux d'automatisation pour les véhicules routiers

La différence notable est qu'il existe un niveau de plus pour les véhicules routiers. En effet, les niveaux 2 et 3 pour les véhicules routiers correspondent approximativement au niveau 2 pour les trains tel que définis par l'UITP.

Différentes exploitations et développements de trains autonomes ont lieu au niveau mondial. Par exemple, en Australie, un train autonome est en circulation depuis 2018 sur une portion de 280 kilomètres reliant le port de Cap Lambert au site minier de Tom Price. Il s'agit exclusivement de trains transportant des minerais et roulant à 80 km/h au maximum. Ces trains sont surveillés à distance par un centre situé à Perth soit à plus de 1'500 kilomètres. En Chine, un train autonome a été mis en service le 31 décembre 2019 entre Pékin et Zhangjiakou. Il peut rouler jusqu'à 350 km/h et un surveillant se trouve en permanence à bord. Ce train est équipé d'environ 2'178 capteurs. Concernant l'Europe, Alstom et la SNCF se sont associés en France pour développer des trains autonomes pour le fret et le transport de voyageurs (type TER). Des essais sont en cours dans la région des Hauts-de-France. Une première série d'essais en mars 2021 a permis de tester les systèmes de perception des signaux et de géolocalisation d'une rame prototype TER Regio 2N. Puis en mai 2021, de nouveaux tests ont eu lieu pour mettre au point le système permettant de gérer les accélérations et les freinages. Le prototype est équipé de caméras thermiques, de lidars et de radars et circule actuellement à maximum 25 km/h pour les tests. Il est prévu que les tests durent jusqu'en 2023 pour une industrialisation à partir de 2025. En Allemagne, dès décembre 2021, des trains autonomes de type S-Bahn circulent à Hambourg sur le même réseau que les trains standards. Quatre trains autonomes sont en exploitation sur un tronçon de 23 kilomètres. Ce train a été développé par la Deutsche Bahn et le constructeur Siemens. Les manœuvres sont effectuées sans personnel de conduite cependant, par sécurité, lorsqu'il y a des passagers, un opérateur ferroviaire se trouve à bord de la cabine. Les coûts d'investissements pour ce projet se montent à environ 60 millions d'euros.

Il peut être constaté que quelques développements sont en cours au niveau mondial mais qu'ils ne sont pas nombreux.



Figure 55 - Train autonome à Hambourg¹

En Suisse, le projet Smartrail 4.0 avait été lancé par plusieurs entreprises ferroviaires dont les CFF afin de numériser le monde ferroviaire et comprenait notamment le développement d'un train autonome. Cependant, en juillet 2020, l'OFT a jugé que SmartRail était trop orienté sur les aspects techniques et était difficilement gérable. Certains sous-projets continuent mais le développement de l'ATO (automatic train operation) a été abandonné pour l'instant. Pourtant, l'entreprise SOB développe son propre projet de trains autonomes. Son but est d'atteindre le 2^{ème} degré d'automatisation dans un premier temps permettant de gérer les vitesses notamment. Actuellement, une conduite à 100% autonome n'est pas envisagée par SOB hormis pour des manœuvres sans passager. Des essais nocturnes ont lieu depuis 2019 sur la ligne reliant Degersheim à Wattwil dans le canton de St-Gall. De futurs tests pourraient s'étendre à la région du Toggenburg. Le projet est développé grâce à un partenariat entre le SOB, Stadler et RailSystem.

5.8.2. Opportunités et risques des trains autonomes

L'arrivée d'une technologie autonome dans le secteur ferroviaire induit forcément des opportunités et des risques. Les principaux éléments sont décrits ci-après de manière non-exhaustive.

Les systèmes entièrement autonomes permettent d'augmenter la capacité de transport sur une ligne. En effet, les distances de sécurité entre les trains peuvent être raccourcies permettant ainsi de faire circuler des trains supplémentaires sur une même infrastructure car la technologie est considérée comme plus réactive que l'être humain. La ponctualité serait également améliorée car la tenue de l'horaire est influencée par le style de conduite du mécanicien de train. Un gain en flexibilité est possible en cas d'imprévus par exemple pour un échange de rame ou des manœuvres de dernière minute à effectuer car il n'y a plus besoin de trouver un mécanicien pour ces tâches non planifiées. Des réductions de coûts sont possibles pour la maintenance de l'infrastructure. En effet, l'usure est influencée par la manière dont l'humain conduit le train et une automatisation permet de réduire certains types d'usure. De plus, un train autonome offre plus de confort aux passagers car les freinages et les accélérations sont gérés de manières plus fines et fluides. Le système autonome permet de réduire la consommation énergétique des trains de l'ordre de 15 à 30 % selon les sources. Une opportunité est de pouvoir développer les offres de transports publics dans les régions rurales grâce à une réduction des coûts d'exploitation.

Certaines difficultés relevées pour le déploiement en Europe des trains autonomes sont que les trains de marchandises et les trains pour les passagers partagent les mêmes infrastructures. Il y a donc ainsi une forte densité de trafic laissant peu de possibilités de développement. De plus les différents chantiers et croisements existants ainsi que les différents types de trains pouvant avoir des caractéristiques différentes (par ex : le poids) ajoutent des difficultés non-négligeables pour le côté opérationnel. En effet, le résultat de différentes analyses montre que des adaptations sur les infrastructures existantes devront être mises en place pour le déploiement des trains autonomes avec des coûts conséquents à considérer. Un risque important est la non-acceptation de cette nouvelle technologie par les usagers et les mécaniciens de locomotives. Les syndicats des milieux concernés ont déjà exprimé leur réticence face à l'arrivée de trains totalement autonomes.

¹ Source : <https://www.basichinking.de/blog/2021/10/12/hamburg-startet-erste-autonome-s-bahn/>

5.8.3. Comparaisons technologiques

La base des technologies utilisées sur les navettes et les trains autonomes possède plusieurs similitudes. Tout d'abord, toutes deux sont équipées d'un système de localisation permettant de connaître leur position précise. Pour les trains, des éléments de l'infrastructure peuvent également compléter le dispositif de localisation. Les navettes et les trains doivent être capables de détecter des obstacles et sont donc équipés de nombreux capteurs (lidars, radars et caméras). La vitesse de circulation des trains représente une difficulté majeure car les obstacles doivent être détectés sur les voies ou à leur abord très en amont afin que le train puisse s'arrêter à temps. Que ce soit pour les trains et les navettes, la technologie embarquée doit permettre aux véhicules de faire face à tous les problèmes tout en assurant la sécurité des passagers à bord. Il est primordial d'avoir un système de communication entre le véhicule et les passagers. Dans le cadre de l'expérimentation de Marly, ce rôle était assuré par les grooms. Toutes les données récoltées par les systèmes pourraient être valorisées en permettant par exemple de créer des états de situation sur la qualité de l'infrastructure ferroviaire et routière. Ces données pourraient être des aides précieuses pour les services chargés de l'entretien des infrastructures. Pour les trains et les navettes autonomes, l'atteinte du niveau maximal d'automatisation est étroitement liée à l'utilisation de l'intelligence artificielle et de l'Internet des objets (IoT). Les véhicules et les infrastructures doivent être capables de dialoguer entre eux. Les enjeux liés à la cybersécurité sont cruciaux pour le développement des systèmes autonomes.

Le tableau ci-dessous illustre une comparaison des technologies utilisées dans les véhicules routiers autonomes et les trains autonomes.

a/a	Autonomous Vehicles	Autonomous Trains	Utility of Technology
1	Cameras	Infrared Cameras	Read signage, traffic control devices, lane markings, surrounding environment, etc.
2	Laser Illuminating Detection and Ranging (LIDAR)	Laser Illuminating Detection and Ranging (LIDAR)	Create 3D maps and help detecting potential hazards. Can determine the distance and object profile by bouncing the laser beam off the object surface.
3	Radar	Radar	Accurately measures the speed of nearby vehicles and trains in real time that cannot be adequately achieved by using LIDAR.
4	Sensors	Ultrasonic Sensors	Sensors perform the role of a self-monitoring device to ensure that a vehicle/train is not speeding and monitor the overall vehicle/train functionality. Also, they perform the role of object detection.
5	Dedicated Short-Range Communications (DSRC)	Dedicated Short-Range Communications (DSRC)	The DSRC is a short-range communication system with a reliable two-way high-speed radio service that can be effectively deployed for V2V and V2I communication. It can provide warning at highway-rail grade crossings regarding an approaching AT.
6	Stereo Video	Stereo Video	The stereo video uses two cameras to capture a 3D-environment that forms the basis for various assistance systems in the vehicle/train. It helps in measuring the depth accurately.
7	Human-Machine Interface (HMI)	N/A	It is a combination of systems inside the vehicle, which includes panels and controls for the interaction between the vehicle and its occupants.
8	Domain Controller	Domain Controller	This is the main "brain" of the autonomous driving system that controls the signals and information from LIDAR, sensors, cameras, etc. and determines necessary actions accordingly.
9	Motion Control Systems, Actuators, Mechatronic Units	Motion Control Systems, Actuators, Mechatronic Units	They work in combination with other technologies for execution of different actions that were received from the domain controller.
10	N/A	Positive Train Control (PTC)	It is a GPS-based technology that is used to stop the train, avoid collision, and any unwarranted train movements.

Figure 56 - Comparaison des technologies sur des véhicules routiers et des trains autonomes²

Au niveau européen, l'ERTMS (European rail traffic management system) a pour objectif d'unifier les systèmes de transports ferroviaires et comprend le contrôle des trains grâce au système ETCS (European Train Control System). Ces éléments doivent permettre la communication entre les trains et les centres de contrôle à distance leur transmettant des informations sur la vitesse autorisée, les accélérations et les freinages notamment. Il s'agit donc d'un système d'assistance à la conduite des trains. Cet élément peut être mis en lien avec les développements présentés dans cette étude sur la téléopération des véhicules routiers.

² Source : Prashant Sigh, Maxim A. Dulebenets, Junayed Pasha, Ernesto D. R. Santibanez Gonzalez, Yui-Yip Lau, Raphaël Kampmann, Deployment of autonomous trains in rail transportation : current trends and existing challenges, Juillet 2021

5.8.4. Comparaisons sur l'acceptance sociale

Comme pour les véhicules routiers autonomes, la question de l'acceptance sociale pour les trains autonomes est primordiale. La perception du conducteur n'est pas identique entre les trains et les véhicules routiers. En effet, les passagers ne sont actuellement pas en contact direct avec le conducteur d'un train contrairement à un bus ou une voiture particulière où au minimum un contact visuel est établi. Différentes études ont été réalisées sur l'acceptance sociale des trains autonomes dont les éléments les plus pertinents sont résumés ci-après.

La réticence du personnel des entreprises de transport ferroviaire est très forte face à l'automatisation des trains. La SNCF indique qu'il n'y aura pas moins d'emplois mais une modification des métiers. A titre informatif, en 2020, la SNCF employait environ 14'500 conducteurs de trains, La SNCF évoque également la possibilité d'avoir toujours à bord un agent d'accompagnement. La demande de compétences plus élevées pour les nouveaux métiers créés (par exemple des téléopérateurs) provoque de grandes craintes pour les personnes n'ayant pas les facultés de faire des études ou apprentissages avec des hautes exigences techniques. Cette problématique est également valable pour les transports publics routiers si l'automatisation se concrétise. Les personnes directement touchées doivent pouvoir avoir une vision claire en amont des nouveaux métiers créés et de leur propre opportunité future sinon un système autonome n'aura pas un taux d'acceptance élevé. Certains syndicats ont déjà annoncé qu'ils lutteraient contre l'automatisation des trains.

Dans le cadre de l'étude « Génération spontanée et provoquée d'idées relatives au train autonomes à différents niveaux d'automatisation³ », des sondages ont été effectués auprès des passagers afin de connaître leurs sentiments face aux trains autonomes de niveau 3 avec personnel à bord et de niveau 4 sans personnel à bord. Pour le train autonome de niveau 3, la présence d'un humain à bord est rassurante. Les sondés pensent que ce train sera sécuritaire, performant et rapide. Cependant, pour le train autonome de niveau 4, les sondés se montrent beaucoup plus réticents. En effet, ils indiquent une déshumanisation, un sentiment d'abandon et un manque de contact. Ils jugent aussi que ce train serait moins sécuritaire sans présence humaine à bord. Il peut ainsi être constaté qu'il y a une forte différence entre l'acceptance d'un train autonome de niveau 3 et de niveau 4. L'illustration ci-dessous est tirée de l'étude mentionnée précédemment et montre les catégories de mots qui viennent à l'esprit des personnes sondées ainsi que s'ils sont positifs ou négatifs.

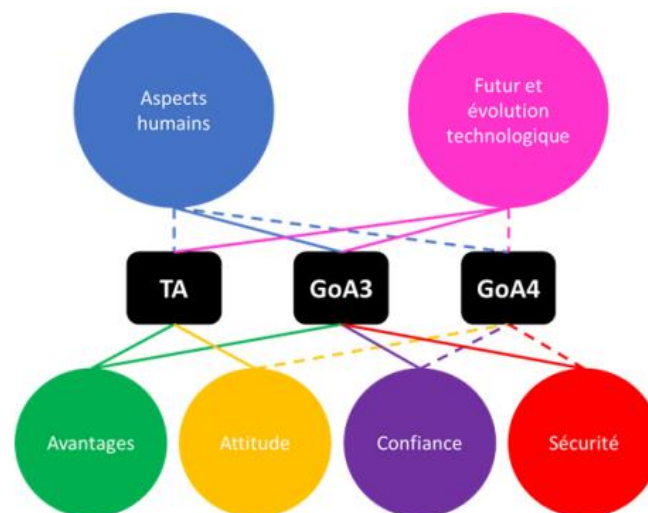


Figure 57 - Catégories de mots qui viennent à l'esprit des sondés (TA : train autonome, GoA3 : niveau d'automatisation 3, GoA4 : niveau d'automatisation 4, trait plein : relation positive, trait en pointillé : relation négative)

³ Source : Aurore Lemonnier, Sonia Adele. Génération spontanée et provoquée d'idées relatives au train autonome à différents niveaux d'automatisation, une étude pilote. Epique 2021, 11ème Colloque de Psychologie Ergonomique, Jul 2021, Lille, France. 8p. fhal-03318022

D'autres études obtiennent des résultats plus positifs comme pour l'étude « User Acceptance of fully autonomous public transport »⁴ ou « A survey on the acceptance of unattended trains »⁵. Par exemple, il est stipulé que le fait que le train ne peut pas dévier de sa voie est un élément rassurant par rapport aux voitures autonomes. Comme il n'y a pas actuellement de contact direct entre le conducteur du train et les passagers, ces derniers seraient moins perturbés par la mise en service de trains totalement autonomes. Des craintes sont émises par rapport à une potentielle augmentation des accidents de personnes s'il n'y a plus de conducteur à bord. De manière générale, ces deux études indiquent que les personnes interrogées acceptent les trains autonomes mais les résultats sont nuancés en fonction de l'âge. En effet, les plus de 60 ans sont plus réticents tandis que la tranche 25 – 39 ans sont les plus ouverts à ce type de technologie. Les utilisateurs fréquents des transports publics ont plus confiance. Cependant, les inquiétudes sont importantes concernant la cybersécurité et les piratages informatiques.

Les études concernant l'acceptance sociale des trains autonomes sont moins nombreuses que pour les voitures autonomes. Cependant, il est très intéressant de constater que les préoccupations sont les mêmes pour les deux mondes. La circulation de métro automatique aide l'acceptation future de trains autonomes mais les peurs de cyberattaques sont importantes autant pour les trains que les voitures. Un accompagnant à bord est rassurant et demeure essentiel pour augmenter l'acceptance des nouveaux systèmes. Une partie de la population se montre ouverte aux nouvelles technologies mais cet élément dépend de l'âge des personnes. Les conducteurs de véhicules routiers ou de trains sont particulièrement réticents face à l'arrivée de ces nouvelles technologies qui influenceront grandement leur avenir ce qui est totalement compréhensible. Pour l'heure, les nouveaux métiers créés sont flous et n'offrent pas des garanties suffisantes pour les personnes concernées. Autant dans le monde routier que ferroviaire, le chemin est encore long et semé d'obstacles avant que l'acceptance sociale soit suffisante auprès d'une grande majorité de la population permettant une démocratisation de la mobilité autonome.

5.8.5. Comparaisons réglementations

L'exploitation ferroviaire est régie par divers règlements de type CEI, CENELC ou ISO en Europe. Comme évoqué précédemment, des harmonisations sont en cours en Europe pour les systèmes ferroviaires (ERTMS) et les systèmes de communication entre le train et l'infrastructure (ECTS). Ces éléments devraient permettre d'avoir des systèmes compatibles entre les différents pays européens. De manière générale, comme pour le monde routier, les lois et réglementations ferroviaires ne sont pas encore prêtes pour permettre la circulation de trains totalement autonomes. Malgré les essais en cours en Europe, une standardisation n'est pas encore possible. En effet, l'établissement d'un cadre légal est fortement lié aux notions de responsabilités et de sécurité. Les questions autour de la transmission des obligations légales de l'exploitant vers le fabricant du train sont très complexes et n'ont pas encore trouvé de réponse à ce jour. Le cadre légal devra également considérer l'intégration d'autres systèmes comme la téléopération par exemple. Au Royaume-Uni, un projet de loi est en cours pour définir quand les compagnies d'assurances paieraient en cas d'accident. La notion d'éthique doit également être prise en compte dans l'élaboration du cadre légal amenant de nombreuses interrogations sur les programmations et prises de décisions des ordinateurs en cas de comportements inattendus et les responsabilités de l'humain ayant fait les programmations et les schémas de décisions. Des homologations devront être menées pour la partie physique du véhicule mais également pour la partie logicielle. Ce dernier point ouvre des questions liées aux mises à jour des logicielles et les vérifications à entreprendre pour chacune d'elles. Les revues littéraires sur le sujet démontrent toutes que le défi de création d'un cadre légal commun sera plus ardu que le développement de la technologie elle-même. La figure ci-dessous fait une comparaison entre différents systèmes autonomes en termes d'automatisation attendue dans un proche avenir et le niveau de réglementations existantes.

⁴ Source : Christina Pakusch et Paul Bossauer, User Acceptance of fully autonomous public transport, ICETE 2017 - Volume 2: ICE-B, pages 52-60, 2017

⁵ Source : Morast, Albrecht and Voß, Gudrun M. I. and Dautzenberg, Pia S. C. and Urban, Peter and Nießen, Nils, A Survey on the Acceptance of Unattended Trains. (<https://ssrn.com/abstract=4010336>)

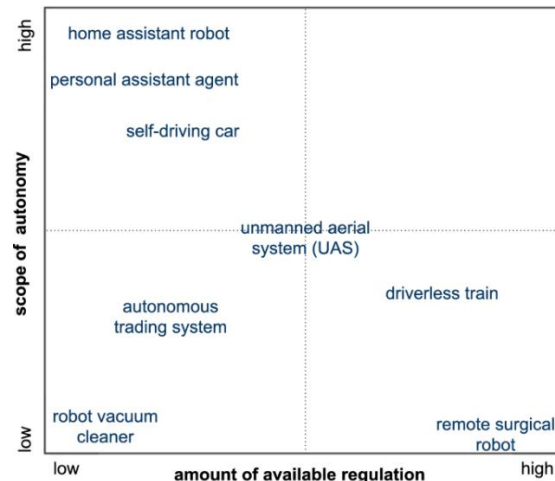


Figure 58 - Comparaisons entre le niveau d'automatisation et les réglementations existantes⁶

Les problématiques sont identiques entre les mondes routiers et ferroviaires. Le cadre légal n'est pas encore prêt pour autoriser totalement l'exploitation de véhicules et trains autonomes de manière régulière.

5.8.6. Interaction des deux systèmes dans le contexte des TPF

Dans ce chapitre, l'hypothèse est faite que des trains totalement autonomes circulent sur le réseau ferroviaire des TPF. Des navettes, elles aussi autonomes, parcourent le dernier kilomètre tandis que des bus avec chauffeur continuent de circuler sur les grands axes. Les navettes autonomes ont pour objectif de desservir les quartiers et à amener les clients vers une ligne de bus principale ou une gare ferroviaire.

Actuellement, un centre d'exploitation surveille le trafic ferroviaire et routier des TPF. Lors d'imprévus (accident, panne, congestions, retards, etc.), les opérateurs de ce centre mettent en place des solutions pour acheminer les clients à destination et rétablir le plus rapidement possible le trafic (mise en place de déviations, échange de véhicule, mise en place de remplacement de trains, etc.). Les opérateurs peuvent contacter directement les chauffeurs de bus et les mécaniciens de trains. Ils gèrent également les absences de dernières minutes du personnel. Ils ont accès à des logiciels leur permettant d'interagir avec les écrans destinés aux voyageurs sur les quais des gares ou dans les véhicules par exemple. Ils peuvent faire des annonces sur haut-parleur si besoin. Les opérateurs actuels des TPF s'occupent soit du domaine ferroviaire soit du domaine routier. Une gestion des deux domaines en même temps n'est pas possible actuellement à cause de la densité du trafic, du nombre de sollicitations ou encore de la multitude de logiciels à maîtriser dans chaque domaine. Ces éléments n'empêchent pas les opérateurs ferroviaires et routiers de communiquer entre eux pour trouver des solutions aux imprévus.

Dans le futur, ce centre d'exploitation pourrait devenir un centre de téléopération et de supervision. Les opérateurs seraient des intervenants directs en cas d'imprévus non gérés par les systèmes autonomes. Ils pourraient les conduire à distance ainsi que communiquer et interagir directement avec les passagers à bord. La responsabilité des téléopérateurs est ainsi directement impliquée et les limites d'interactions devraient être clairement définies au préalable entre humains et machines. Pour gérer une flotte de la taille des TPF, un nombre supérieur de téléopérateur serait nécessaire. Certains gèreraient des trains autonomes, d'autres des navettes autonomes et une troisième partie des bus avec conducteurs. Des synergies pourraient avoir lieu entre les navettes autonomes et les bus avec conducteurs. En revanche, il paraît difficile de pouvoir gérer des navettes et des trains autonomes en même temps. Ce mélange pourrait créer des erreurs humaines si le téléopérateur gère des perturbations parallèles sur différents

⁶ Source : Fisher, M., Mascardi, V., Rozier, K.Y. et al. Towards a framework for certification of reliable autonomous systems. *Auton Agent Multi-Agent Syst* 35, 8 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10458-020-09487-2>

systèmes. Cependant, les interactions entre téléopérateurs restent primordiales comme aujourd'hui pour garantir la chaîne totale de transport pour les passagers. Des algorithmes et des interfaçages des systèmes pourraient apporter une aide précieuse aux téléopérateurs pour optimiser les interventions. En effet, si par exemple un train est en retard, l'information du retard pourrait être transmise directement aux clients soit sur leur smartphone soit sur des écrans d'informations dans les navettes et les bus conventionnels. Cette automatisation de la transmission d'informations soulagerait les téléopérateurs de certaines tâches pour leur permettre de se concentrer sur le trafic et les situations problématiques. De plus, en cas de retard d'un bus, les navettes autonomes pourraient être capables seules de décider d'attendre le bus et de retarder son départ. Ce point ouvre aussi la question sur l'abandon des horaires fixes et cadencés connus aujourd'hui au profit d'un système où l'utilisateur sait en direct où se trouve son bus ou train lui permettant d'anticiper le départ de son domicile par exemple. La transmission d'informations sur le trafic en temps réel serait une aubaine autant pour la navette autonome que pour le conducteur de bus. Dans tous les cas, ces systèmes doivent apporter une plus-value positive pour l'utilisateur des transports publics qu'ils soient autonomes ou non. Dans des zones denses de circulations de systèmes de transport autonomes, il serait judicieux d'analyser si le téléopérateur doit se situer physiquement proches des véhicules ou non. Dans le cadre des navettes autonomes, une présence physique à proximité pourrait être intéressante pour des interventions sur place plus réactives qu'à partir d'une centrale.

6. Conclusion

6.1. Appréciation générale

En regardant l'expérimentation sur sa globalité et durant les deux projets, les TPF ont pu acquérir de très nombreuses connaissances dans la mobilité autonome et ouvrir ainsi de nouvelles perspectives pour l'entreprise. Le premier projet a constitué une montée en puissance avant d'atteindre un niveau de stabilisation durant le second projet. La maturité technologique et la définition des limites d'utilisation ont permis d'avoir une vision plus claire sur le type de services que pourraient offrir des navettes autonomes de ce type. En effet, les navettes comme celles de Navya ont un fort intérêt pour la desserte du premier et dernier kilomètre soit pour relier des quartiers ou zones rurales peu densément peuplées à des axes de plus grandes importances. Une desserte sur des horaires plus étendu comme la desserte de nuit pourrait également apporter une importante plus-value à l'attractivité des transports publics en Suisse. Une amélioration possible est clairement l'augmentation de la vitesse commerciale aujourd'hui encore trop peu attractive. Idéalement, il serait nécessaire que les navettes soient un peu plus capacitaires tout en restant dans des dimensions qui leur permettent de circuler aisément dans des quartiers résidentiels étroites et des zones à 30 km/h. Les coûts et le financement restent un obstacle aux déploiements de nouveaux projets. Pour une démocratisation des navettes autonomes, l'acceptance sociale et le cadre légal sont deux points cruciaux qui nécessitent encore d'être étudiés en profondeur. Les responsabilités doivent pouvoir être clairement définies pour permettre des déploiements sans personnel à bord. Le manque de maturité technologique a aussi constitué un frein au développement de ce projet et certains objectifs n'ont pas pu être atteints malheureusement. Malgré les difficultés techniques et les nombreux imprévus liés aux chantiers, les TPF tirent un bilan positif de l'expérience. Elle a permis entre autres de développer des collaborations très intéressantes et enrichissantes avec la HEIA-FR et les partenaires du projet. Des initiatives ont ainsi pu être créées comme Swissmoves et SAAM dont les TPF sont des membres actifs.

6.2. Perspectives

Comme stipulé précédemment, deux associations ont vu le jour : Swissmoves et SAAM. Swissmoves est une association fribourgeoise interdisciplinaire qui réunit des partenaires académiques comme la HEIA-FR, la HEG ainsi que la faculté de droit de l'Université de Fribourg ainsi que les TPF. Le projet de la ligne 100 a permis d'effectuer des analyses sur la sécurité fonctionnelle, la cybersécurité et des développements très prometteurs sur la téléopération. De nouveaux projets sont en cours de réflexions pour continuer à faire évoluer les compétences acquises par les différents partenaires durant les quatre dernières années notamment en lien avec la téléopération.

Au niveau suisse, la Swiss Association for autonomous mobility a aussi vu le jour. Cette association regroupe différentes entreprises de transports publics, des partenaires académiques et des entreprises privées. Elle a pour objectif d'accélérer et de soutenir le développement de la mobilité autonome en Suisse. Cette association permet aux TPF d'élargir leurs contacts et leurs connaissances en profitant de toutes les expériences acquises en Suisse ces dernières années. Elle permet également de donner un poids plus fort aux projets et initiatives dans ce domaine auprès de la Confédération. Les aspects liés à la technologie, l'acceptance sociale et le cadre légal sont discutés au sein de différents groupes de travail.

En participant à ces deux associations, les TPF souhaitent continuer à partager leurs propres expériences tout en créant de nouvelles collaborations sur des futurs projets innovants en lien avec la mobilité autonome.

7. Table des figures

Figure 1 - Marly Innovation Center en 2021 (Source : MIC)	3
Figure 2 - Organisation interne (Source : TPF)	5
Figure 3 - Etapes du projet 1 et 2 (Source : TPF)	6
Figure 4 - Travaux sur le MIC (Source : Groupe E).....	7
Figure 5 - Zone de conflit entre navettes et camions (Source : map.geo.admin.ch)	7
Figure 6 - Pente détectée (Source : TPF)	8
Figure 7 - Tracé et arrêts (Source : map.geo.admin.ch).....	9
Figure 8 - Navettes dans le garage (Source : TPF).....	9
Figure 9 - Accès au garage en mode automatique (Source : TPF)	9
Figure 10 - Horaire ligne 100, direction MIC	10
Figure 11 - Horaire ligne 100, direction Epinettes	10
Figure 12 – Navette 699 rouge et Navette 698 verte (Source : TPF)	11
Figure 13 - Défaut lidars (Source : TPF)	13
Figure 14 - Travaux du nouvel écoquartier (Source : MIC)	16
Figure 15 - Vitesses moyennes projet Marly 2.0	17
Figure 16 - Conduite en manuel projet Marly 2.0	17
Figure 17 - Corrélacion entre vitesse moyenne et conduite en manuel.....	18
Figure 18 - Kilomètres parcourus projet Marly 2.0	18
Figure 19 - Kilomètres mensuels projet Marly 2.0	19
Figure 20 - Kilomètres parcourus projets 1 et Marly 2.0	19
Figure 21 - Kilomètres mensuels projets 1 et Marly 2.0	20
Figure 22 - Passagers transportés projet Marly 2.0	20
Figure 23 - Passagers transportés projets 1 et Marly 2.0.....	21
Figure 24 – Taux de disponibilité par navette	23
Figure 25 - Définition des secteurs	23
Figure 26 - En jaune, secteurs à vitesse réduite	24
Figure 27 - Vitesse actuelle estimée en m/s direction MIC.....	24
Figure 28 - Vitesse actuelle estimée en m/s direction Marly.....	24
Figure 29 - Graphique distance / temps-vitesse - direction MIC	25
Figure 30 - Graphique distance / temps-vitesse - direction Marly	25
Figure 31 - Vitesse projetée en rouge en m/s direction MIC.....	26
Figure 32 - Graphique distance / temps-vitesse projetée - direction MIC	26
Figure 33 – Vitesse projetée en rouge en m/s direction Marly.....	26
Figure 34 - Graphique distance / temps-vitesse projetée - direction Marly	27
Figure 35 - Comparaison des vitesses actuelles et projetées – direction MIC.....	27
Figure 36 - Comparaison des vitesses actuelles et projetées – direction Marly.....	28
Figure 37 - Exemple de résultats du calcul de viabilité économique de la téléopération	29
Figure 38 - Appropriation collective (six contextes identifiés) (Source : HEIA-FR)	31
Figure 39 - Acceptabilité selon Nielsen (1993).....	31
Figure 40 - Eléments du POC (Source : HEIA-FR)	32
Figure 41 - Démonstrateur PerceptIn et Navette Navya (Source : TPF).....	32
Figure 42 - Centre de contrôle de la téléopération (Source : HEIA-FR)	33
Figure 43 - Architecture préliminaire de la téléopération	33
Figure 44 - Safety Goals et Safe State	34
Figure 45 - Vue du dessus des mesures pour la localisation (Source : HEIA-FR).....	35
Figure 46 - Images couleurs et thermiques (Source : HEIA-FR)	35
Figure 47 - Carte physique du MIC (Source : HEIA-FR)	36
Figure 48 - Carte de segmentation du MIC (Source : HEIA-FR)	36
Figure 49 - Algorithmes de "Path Finding" (Source : HEIA-FR).....	37
Figure 50 - Caractéristiques du PIXLOOP (Source : HEIA-FR).....	37
Figure 51 - Plateforme PIXLOOP (Source : HEIA-FR)	37

Figure 52 - Planning de déploiement de véhicules autonomes en France	39
Figure 53 - Définition des niveaux d'automatisation pour les trains (Source : Alstom).....	41
Figure 54 - Définition des niveaux d'automatisation pour les véhicules routiers	42
Figure 55 - Train autonome à Hambourg	43
Figure 56 - Comparaison des technologies sur des véhicules routiers et des trains autonomes	44
Figure 57 - Catégories de mots qui viennent à l'esprit des sondés	45
Figure 58 - Comparaisons entre le niveau d'automatisation et les réglementations existantes .	47
Tableau 1 - Problèmes rencontrés du 01.10-10.12.2021	6
Tableau 2 - Problèmes rencontrés.....	12
Tableau 3 - Listes des interventions de Navya.....	22
Tableau 4 - Description des secteurs.....	24