

Rapport final



Source : TPF | Jo Bersier

Une navette automatisée pour réaliser les transports de demain

Phase 1

Version définitive

Mai 2020

**Point de vue des
Transports publics fribourgeois**



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	6
3. ORGANISATION ET SUIVI	6
4. BILAN DÉTAILLÉ DU 01.10.2019 AU 31.03.2020.....	8
4.1. Développements effectués	8
4.2. Problèmes détaillés du cinquième semestre.....	11
5. RESULTATS D'EXPERIENCES FINAUX DU POINT DE VUE DE L'EXPLOITANT	15
5.1.1. Rappel : Parcours 1 du 21.09.2017 au 30.09.2019.....	15
5.1.2. Rappel : Descriptions des navettes	15
5.2. Aspects techniques	16
5.2.1. Exemples de quelques problèmes rencontrés	19
5.2.2. Analyse du problème de localisation.....	21
5.3. Exploitation.....	23
5.3.1. Exemples de quelques problèmes rencontrés	23
5.3.2. Analyses.....	25
5.4. Aspects sécuritaires	30
5.5. Aspects environnementaux	31
5.5.1. Analyse et mesure de surchauffe dans le câblage.....	31
5.5.2. Analyse de l'autonomie des batteries	32
5.6. Aspects sociaux	34
5.6.1. Usagers.....	34
5.6.2. Personnel TPF	36
5.7. Aspects économiques	37
5.8. Critères pour une exploitation future.....	38
6. CONCLUSION.....	39
6.1. Appréciation générale des TPF	39
6.2. Perspectives.....	40
7. TABLE DES FIGURES.....	42

2. Introduction

Le 22 septembre 2017 marquait le lancement officiel de la ligne numéro 100 des Transports publics fribourgeois. Il s'agissait, à l'époque, de la première ligne de transport public exploitée avec des navettes automatisées et officiellement intégrée à l'horaire national. Cette ligne a pour but de relier un ancien site industriel à Marly en reconversion pour devenir un éco quartier à la ligne existante numéro 1 de l'Agglomération fribourgeoise.

L'exploitation de navettes automatisées fait l'objet d'autorisations spéciales d'expérimentation délivrées par différents offices fédéraux. La convention de Vienne au niveau européen contraint les exploitants à la présence obligatoire d'un accompagnant à bord. Dans le cas des essais TPF, cet accompagnant est surnommé un « groom » en référence à l'époque où un accompagnant était courant dans les ascenseurs des hôtels.

Après deux ans et demi d'expérimentation, il est temps de tirer les conclusions de cet essai en partageant les différentes découvertes, surprises et résultats des études annexes effectuées. Tout d'abord, un rappel du contexte et de l'historique du projet est présenté. Les objectifs et l'organisation du projet sont également rappelés. Puis la première partie des résultats concerne le cinquième semestre d'exploitation. Le chapitre suivant contient quelques rappels sur l'ancien parcours et les véhicules afin d'avoir tous les éléments en tête pour bien comprendre les résultats globaux des deux ans et demi d'expériences classés dans différentes catégories. Les réflexions menées dans les prochains chapitres portent le regard de l'entreprise exploitante et donc une vision concrète sur le terrain et complète le rapport de suivi de la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture du canton de Fribourg (HEIA-FR). D'autres études effectuées par la filière électrique notamment permettent de compléter et approfondir certains aspects plus pointus, comme par exemple l'analyse de la sécurité fonctionnelle et de la cyber sécurité des navettes automatisées et sont également présentées dans ce rapport. Les TPF ont également pu définir les critères primordiaux pour envisager d'autres exploitation dans le futur.

Entre temps, différentes entreprises de transports publics ont également lancé leur propre essai de véhicules automatisés. Des échanges ont lieu et devraient être accentués ces prochains mois grâce à la mise en place de collaborations.

Concernant l'essai de Marly, une deuxième phase d'expérimentation est en cours de lancement et a pour but d'étudier d'autres sujets présentés dans la conclusion de ce rapport.

2.1. Contexte et historique du projet

L'Agglomération de Fribourg (ci-après : l'agglo) prévoit une croissance démographique à l'intérieur de son périmètre d'urbanisation. Pour absorber cette dernière, il est prévu, notamment, de saisir des opportunités telles que des reconversions de zones industrielles en zones de mixités (habitat et activités secondaires ou tertiaires). Dans ce contexte, il est nécessaire d'accompagner ces transformations urbaines avec une offre en transport public performante, qui répond à la demande des usagers en termes de cadence-horaire et de couverture du territoire.

Dans ce cadre, le Marly Innovation Center (ci-après MIC) illustre parfaitement le développement précité. En effet, le site à caractère industrielle subit actuellement une mutation pour devenir un centre technologique pour le canton de Fribourg et la Suisse. Il offre différents types de surfaces à louer tels que des laboratoires, des surfaces de stockage ou des surfaces de bureaux.



Figure 1 - Marly Innovation Center

Dans un horizon de 15 ans, les abords du MIC seront également pourvus d'environ 1000 nouveaux logements. Fin 2019, le site était occupé par 150 entreprises employant environ 500 personnes. Un nouveau quartier résidentiel va accueillir ses premiers habitants sur le site à fin 2021. Les travaux de construction ont débuté en fin 2019 et la première étape comprend la création de 362 logements. Ces nouveaux immeubles verront le jour à l'Est des constructions actuelles (grand pré en arrière-plan sur la Figure 1). A cet horizon, la ligne de bus 8 Fribourg – Corminboeuf devrait desservir le site.

Dans ce contexte, la zone a besoin désormais d'une desserte attractive en transports publics afin de pouvoir continuer son développement. Différentes réflexions ont été initiées par les responsables du MIC en collaboration avec un bureau d'études (Team +), l'Agglo, le Canton et la Commune de Marly dans le but de trouver une solution appropriée et raisonnable à la desserte immédiate du site par les transports publics. Diverses solutions de desserte ont été esquissées comme le prolongement d'une ligne existante ou la création d'une nouvelle ligne afin de desservir ce site avec des bus classiques à court terme mais s'avère problématique d'un point de vue financier.



Figure 2 – Etape 1 de construction

Le développement des véhicules autonomes électriques durant ces dernières années a été important. Cette technologie permettra à futur de régler le problème de desserte par des transports publics sur le dernier kilomètre. Les coûts sont réduits par rapport à une solution de bus classiques en raison de ses coûts d'exploitation plus faibles. Cette solution est donc parfaitement adaptée pour la desserte du MIC avec ses exigences. Cette dernière est soutenue par les propriétaires du site et les participants au projet. Cette nouvelle offre est intégrée au réseau existant de l'agglo.

La Commune de Marly qui compte 7'700 habitants est desservie par la ligne 1 (Marly – Pérolles - Fribourg gare – Portes-de-Fribourg) du réseau Agglo ainsi que par les lignes régionales 129 (Fribourg – Marly – Giffers – Plaffeien), 231 (Fribourg – Le Mouret – Bonnefontaine), 233 (Fribourg – Treyvaux Le Pratzey), 234 (Fribourg – La Roche – Bulle) et 245 (Fribourg – La Roche – Charmey – Jaun).

La ligne 1 offre une cadence à 7.5 minutes en heure de pointe. Son itinéraire au cœur de la localité emprunte la route de Fribourg puis la route de la Gruyère jusqu'à son terminus à l'arrêt Gérine.

Cinq arrêts de bus se situent sur la ligne 1 sur le territoire de Marly : Les Rittes, Grand Pré, Jonction, Cité et Gérine. Les bus régionaux s'arrêtent aux arrêts Cité et Grand Pré.

Le MIC ne jouit donc pas d'une desserte directe de sa zone d'activité. Les arrêts les plus proches sont Marly Jonction et Marly Cité situés à environ 800 mètres à pied depuis l'entrée du site.

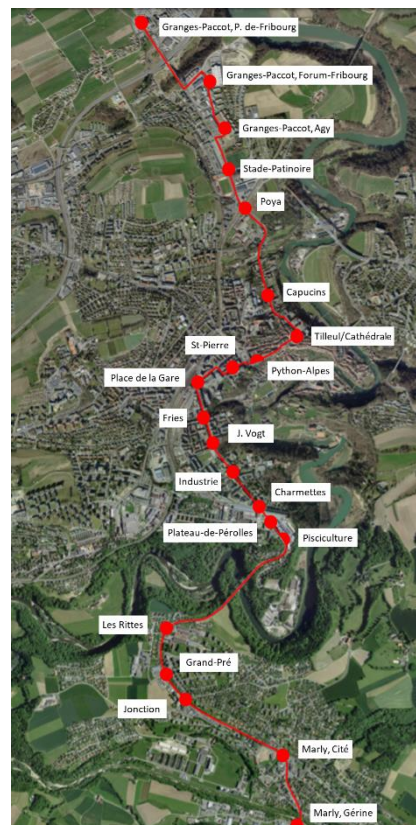


Figure 3 - Itinéraire Ligne 1

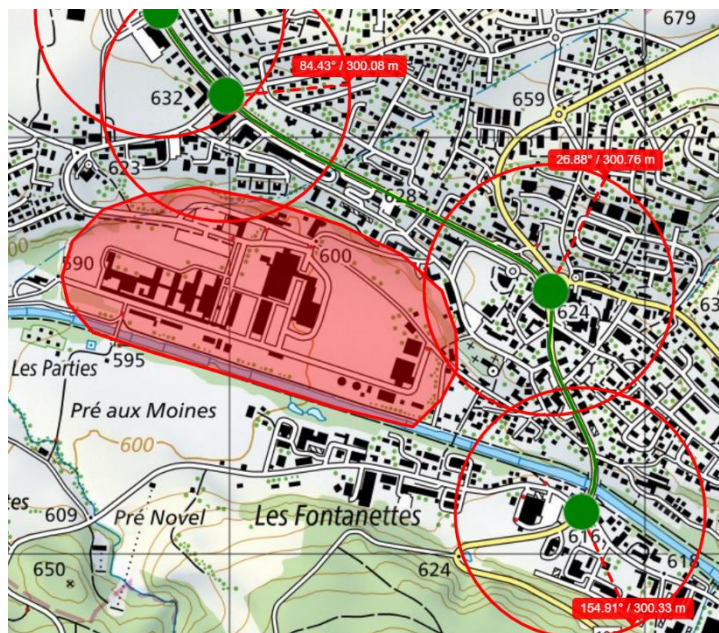


Figure 4 - Arrêts de bus avec périmètre de desserte

2.2. Objectifs du projet

Les objectifs sont variés et peuvent être résumés de la manière suivante :

- Positionnement des TPF par rapport aux nouvelles technologies
- Intégration à l'horaire national et exploitation la plus conventionnelle possible
- Etude de la fiabilité et de la rentabilité d'une desserte du « dernier kilomètre »
- Acquisition de connaissances techniques
- Connaissances des conditions limites d'exploitation
- Etude de l'acceptation par les différents types d'utilisateurs
- Définition de critères en vue d'exporter le concept ailleurs sur le réseau TPF (toujours dans l'idée de desservir des quartiers ou zones peu ou pas accessibles avec de grands véhicules et ayant peu de potentiel de clients justifiant la mise en place d'un transport conventionnel)

3. Organisation et suivi

La réalisation de ce projet est le fruit de l'investissement de différents partenaires :



L'Agglo de Fribourg soutient le projet en participant financièrement à une partie des coûts d'exploitation de la ligne 100.



L'Etat de Fribourg est également 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.



MARLY INNOVATION CENTER

Le Marly Innovation Center a accueilli avec plaisir et dévouement cette expérimentation. Il apporte également 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 apporté sa pierre 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 cités précédemment font partie du Comité de pilotage du projet chargés de la prise 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. Le projet a également pu profiter de contributions financières de la part du COMO et de la Promotion économique du Canton de Fribourg.

Les TPF travaillent avec la start-up lausannoise Bestmile qui a créé une plateforme capable de gérer l'exploitation de véhicules autonomes. Dans le cadre de cette expérience, leurs services ont permis de mettre à disposition une application destinée aux clients ainsi qu'une application pour les grooms. Cette dernière leur permet d'inventorier les difficultés rencontrées ainsi que de compter le nombre de passagers. Le Centre d'exploitation des TPF et les responsables du projet ont accès à une page internet où les données peuvent être consultées en direct. Il s'agit

notamment de la position des navettes, leur niveau de batterie, le nombre de passagers à bord, leur vitesse et si les portes sont fermées ou ouvertes. Des informations sont également disponibles sur les kilomètres journaliers effectués, les vitesses moyennes et les pourcentages de conduite en mode manuel. Les TPF ont également travaillé avec Bestmile dans le but de pouvoir gérer automatiquement les correspondances entre les bus de la ligne 1 et les navettes automatisées. Le but était que les navettes puissent savoir si un bus est en retard et si elles doivent, de ce fait, attendre la correspondance. Bestmile peut programmer les navettes selon leurs horaires théoriques et les grooms reçoivent une notification push sur l'application qui leur signale qu'il est l'heure de partir. Les correspondances avec le temps réel n'ont pas encore pu aboutir car les TPF ont pris du retard dans le développement de la transmission en temps réel des données de ponctualité des bus.

Concernant l'organisation interne, 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 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 demande une intervention à l'atelier pour des dépannages comme par exemple 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. La conduite du projet est informée et aide, si besoin, à la résolution des problèmes. Par exemple, la conduite de projet fait le lien avec le MIC si une intervention est nécessaire de leur part.

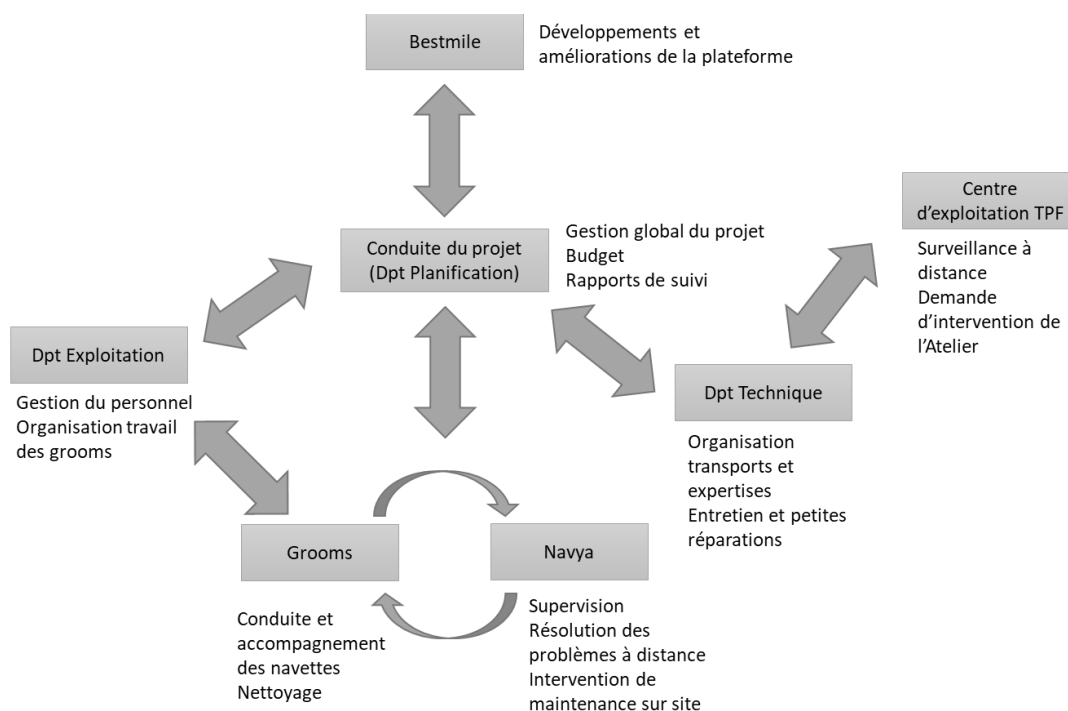


Figure 5 - Organisation interne

Le secrétaire général du DETEC autorise l'essai et il est demandé aux TPF de rendre un rapport d'expérience tous les six mois. Ces derniers sont publics et peuvent être consultés sur leur site Internet. Les TPF ont choisi de collaborer avec la HEIA-FR pour l'élaboration des rapports. Ainsi, deux visions sont apportées : celle du milieu académique et celle de l'exploitant. 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.

Concernant le suivi du projet, différentes étapes et modifications ont eu lieu durant l'essai et sont résumées ci-dessous pour une meilleure compréhension des résultats des chapitres 4 et 5.

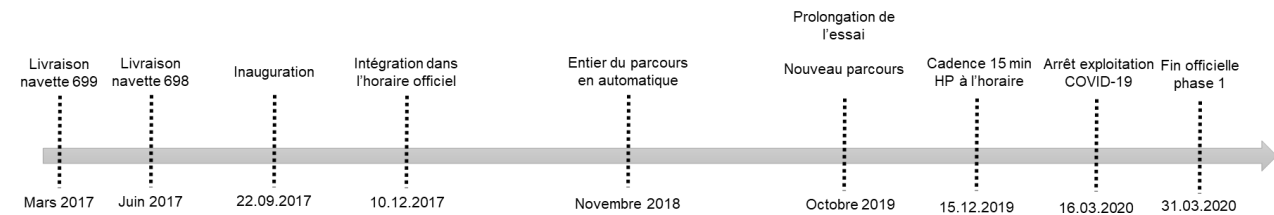


Figure 6 - Etapes du projet

699 : navette rouge

698 : navette verte

HP : heures de pointe

4. Bilan détaillé du 01.10.2019 au 31.03.2020

4.1. Développements effectués

Comme stipulé précédemment, le Marly Innovation Center est en pleine mutation et donc de nombreux travaux sont effectués. Le MIC a obtenu le permis de construire pour une première série d'immeubles locatifs. Afin de ne pas gêner et perturber les navettes, il a été choisi de modifier leur parcours. Ainsi elles peuvent continuer à circuler normalement et l'entreprise de construction peut travailler en toute sécurité également. Le chantier et la zone de circulation des navettes sont délimités par des barrières et de parois en bois.

Parcours du 01.10.2019 au 31.03.2020

Le nouveau parcours est en service depuis le 1^{er} octobre 2019 et la cartographie a été mise à jour en novembre 2019. Les modifications de parcours impactent la desserte interne du site. En effet, seuls deux des trois arrêts sont conservés et le tracé est raccourci passant ainsi d'une longueur totale de 1.3 kilomètres à environ 950 mètres

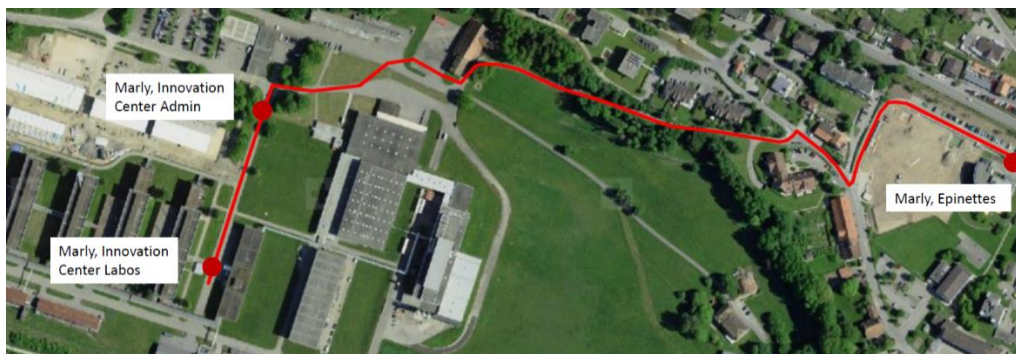


Figure 7 - Tracé et arrêts actuels

Les navettes sont sorties manuellement de leur garage afin qu'elles puissent capter correctement le GNSS et la 3G. Ensuite, elles rejoignent en mode autonome l'arrêt Admin qui est leur terminus. Ce tronçon longe des bâtiments du MIC encore en cours d'aménagements ainsi que le restaurant du site. Lorsqu'il est l'heure, la navette quitte l'arrêt Admin pour se rendre à l'arrêt Labo et faire demi-tour. Ce tronçon en ligne droite permet d'atteindre une vitesse maximum de 18 km/h. Puis la navette repasse au niveau de l'arrêt Admin et bifurque à droite pour sortir du site. Cette sortie a été réaménagée dans le cadre du chantier. Un nouvel accès a été goudronné pour les navettes et permet de séparer le flux des camions de chantier des navettes. Le croisement inévitable des deux flux est géré par un feu de signalisation que les grooms activent manuellement. Des parois en bois ont été installées en prévision d'une future fouille souterraine. Elles permettent d'améliorer significativement la localisation des navettes. Des barrières métalliques complètent le dispositif

de fermeture du chantier. Des géotextiles ont été fixé sur ces dernières et ainsi ces éléments deviennent également des repères de localisation pour les navettes. Au coin de l'ancienne grange, l'angle est relativement vif et par conséquent, un cycliste descendant à vive allure pourrait risquer d'heurter la navette arrivant en sens inverse. Un miroir a donc été installé ce qui permet aux grooms de vérifier si des cyclistes ou piétons arrivent en sens inverse et ainsi d'anticiper un éventuel freinage. Concernant la partie supérieure du parcours, la construction à côté du home des Epinettes est dorénavant terminée. La nouvelle cartographie a ainsi permis d'intégrer les nouveaux éléments sur ce tronçon également. Un trottoir a été fait et ainsi il n'y a plus de conflits avec les piétons sur la route d'accès au home ce qui est une très bonne chose en terme de cohabitation des différents modes.

Le parcours a été séparé en secteur afin d'avoir un moyen simple de se localiser et pour faciliter l'explication de certains résultats. Les lettres représentent la localisation des photos suivantes permettant de se représenter le parcours actuel.

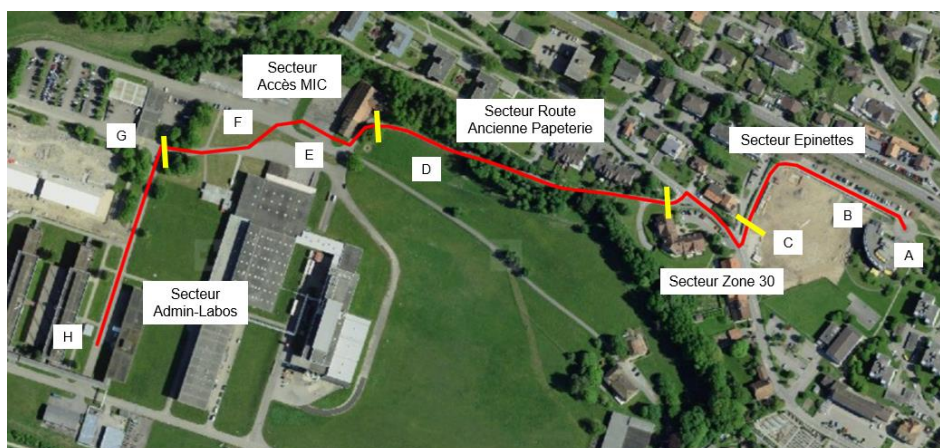


Figure 8 - Plan secteurs parcours et localisation photos



Figure 9 - A) Terminus Epinettes



Figure 10 - B) Parking Epinettes



Figure 11 - C) Intersection zone 30



Figure 12 - D) Route Ancienne Papeterie

**Figure 13 - E) Passage pour navettes****Figure 14 - F) Rampe****Figure 15 - Demi-tour Admin****Figure 16 - Demi-tour Labos**

Depuis le changement d'horaires de décembre 2019, les navettes circulent 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. Les horaires officiels peuvent être consulté sur cff.ch ou sur le site [tableaux-horaires.ch](https://www.tableaux-horaires.ch/fileadmin/fap_pdf/fields/2020/20.100.pdf) (https://www.tableaux-horaires.ch/fileadmin/fap_pdf/fields/2020/20.100.pdf).

Le mois de décembre a permis de stabiliser le nouveau parcours et de mettre à jour le logiciel. Une modification de la programmation des clignotants a dû être effectuée au niveau de l'arrêt Labos. En effet, la navette mettait uniquement son clignotant à droite lorsqu'elle s'arrêtait à l'arrêt Labos. Le clignotant à gauche a été ajouté afin que les automobilistes puissent savoir qu'elle va tourner à gauche pour faire son demi-tour. En début d'année de bons résultats ont pu être constatés au niveau de l'exploitation. De plus, à part quelques épisodes venteux, il n'y pas eu d'importantes chutes de neige entraînant un arrêt prolongé des navettes contrairement à l'année précédente. Malheureusement, c'est finalement la pandémie Covid qui a forcé un arrêt d'exploitation prolongé. En effet, afin de protéger notre personnel car la distance sociale ne pouvant pas être respectée, il a été décidé de stopper l'exploitation de la ligne 100 jusqu'à nouvel avis.

Des nouveautés ont pu être apportées à l'application de Bestmile, « Safety driver App », installée sur les téléphones mobiles des grooms. Grâce à cette application, les grooms peuvent voir où se situent la seconde navette ou le Kangoo en temps réel. En effet, lorsque le groom prend un véhicule, navette ou Kangoo, il l'indique dans l'application et peut ainsi être géo localisé pour le Centre d'exploitation mais également pour les clients. Les grooms peuvent dorénavant indiquer le nombre de clients qui montent et descendent des navettes aux arrêts. L'horaire théorique peut être implémenté dans cette application afin que les grooms reçoivent une notification push leur indiquant qu'il est l'heure d'effectuer la course. Tous les incidents peuvent être enregistrés via l'application permettant ainsi un meilleur suivi et une meilleure analyse statistique. Un premier test de l'app a pu avoir par l'un des grooms début mars. Malheureusement, l'arrêt d'exploitation de la ligne 100 retarde le déploiement de l'application pour tous les grooms.

Les six derniers mois d'exploitation ont été marqués par l'arrivée de plusieurs nouvelles entreprises sur le site ce qui a contribué à augmenter le nombre de clients à bord des navettes. Cette progression est malheureusement stoppée nette par la pandémie.

Il est à noter également que les contrôles techniques des navettes ont eu lieu en décembre en présence de l'OCN et qu'aucun élément en particulier n'a été relevé. Navya a profité du retour des navettes aux Ateliers TPF pour changer différentes pièces. La fiabilité des navettes a donc été bonne durant les premiers mois de l'année 2020.

4.2. Problèmes détaillés du cinquième semestre

Période 1 : 01.10.2019 – 31.12.2019

Période 2 : 01.01.2020-31.03.2020

Problème	1	2	Mesures prises / en cours
Antenne GNSS			Pas de nouvelle apparition du problème
Véhicules franchissant interdiction ou feux rouges	X	X	Dénonciation des véhicules franchissant la mise à ban de la Route de l'Ancienne Papeterie
Météo	X	X	Exploitation perturbée durant 5 jours
Démarrage difficile et VN100	X	X	Augmentation de la récurrence surtout sur P40 en février
Végétation			Pas de souci
Lidar	X		Nettoyage et bruit anormal
Suspensions	X		699
Communication portes	X		698
Essuie-glace	X		698
Chute barrières chantier	X		Sécurisation des barrières par entreprise chantier
Véhicules arrêt Labos		X	Marquage
Routeur	X		698
Batterie 12 V		X	698
Personnel		X	Grippe, suppression de tours de service → Kangoo

- **Antenne GNSS**
Point positif durant le dernier semestre d'exploitation, il n'y a pas eu de problèmes avec l'antenne GNSS. En effet, celle-ci n'a pas eu besoin d'être redémarrée. Des travaux de démolition ont eu lieu sur le bâtiment adjacent mais ils n'ont pas eu d'impacts heureusement.
- **Véhicules franchissant l'interdiction ou les feux rouges**
Comme chaque semestre, des véhicules se sont permis de franchir les interdictions de circuler de la Route de l'Ancienne Papeterie. Le Marly Innovation Center les dénonce lorsque le numéro de plaques a pu être relevé. Certaines périodes sont calmes alors que d'autres jours ce sont plusieurs véhicules par jour qui gênent la circulation des navettes dans la forêt.



Figure 17 - Camion faisant demi-tour au niveau de l'interdiction de circuler

- **Météo et chute des barrières**
Cette saison hivernale a été moins compliquée que les précédentes. En effet, les épisodes neigeux et/ou tempétueux ont été rares. Des perturbations d'exploitation ont eu lieu sur 5 jours. Les interruptions ont surtout été causées par des vents tempétueux entraînant même à deux reprises la chute de barrières de chantier sur le parcours. L'hiver a été clément et seul deux jours de neige ont eu pour conséquence un arrêt d'exploitation.



Figure 18 - Chutes des barrières suite aux vents tempétueux

- **Démarrage difficile et problème VN100**
Malheureusement, les démarrages difficiles des navettes sont un problème qui a été récurrent durant les deux années et demi d'exploitation. Durant ce semestre, une récurrence plus importante a été observée en février sur la navette verte.
- **Végétation**
Ce fait est assez rare pour être mis en évidence : la végétation n'a pas créé de gêne durant tout le cinquième semestre d'expérience.
- **Lidar**
Il est arrivé que des saletés entravent la bonne perception des lidars. Un bon nettoyage avec un chiffon doux a permis de résoudre le problème. Toutefois, un des lidars a commencé à faire un bruit anormal courant février. Navya a été prévu afin qu'il puisse être remplacé.
- **Suspensions**
A nouveau les suspensions ont donné du fil à retordre aux grooms. Elles sont restées parfois coincées et des manipulations ont dû être effectuées pour régler le problème avec l'assistance à distance de Navya.

- **Communication portes**
Avant l'expertise technique de décembre, la navette verte a rencontré des difficultés avec le fonctionnement des portes. Un câble a dû être remplacé.
- **Essuie-glaces**
Egalement avant l'expertise, le moteur de l'essuie-glace avant de la navette verte a cessé de fonctionner et a dû être changé. En attendant l'intervention, les jours de pluie, les grooms ont assuré les prestations avec la navette rouge ou le Kangoo.
- **Véhicules arrêt Labos**
Avant la mise en service du nouveau parcours, des voitures avaient l'habitude de stationner au niveau de l'arrêt. Les navettes font dorénavant demi-tour à cet arrêt et le MIC a donc informé les personnes concernées qu'il n'était plus autorisé de stationner à cet endroit. De plus, du marquage a été fait et depuis la cohabitation se passe mieux.

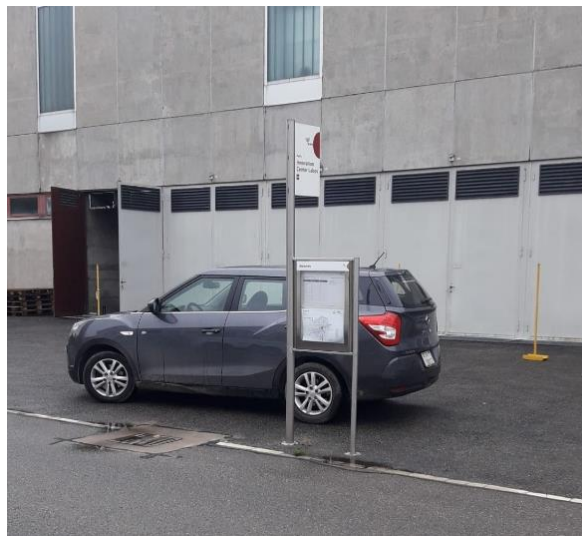


Figure 19 - Voiture mal stationnée à l'arrêt Labos

- **Routeur**
La navette verte a connu des problèmes de routeur à la fin de l'année 2019. Ce dernier a été changé par Navya en début janvier. Sans le routeur, la navette ne pouvait plus recevoir les signaux permettant sa localisation.



Figure 20 - En haut à gauche : pas de réception GNSS

- Batterie 12V
Fin janvier 2020, la batterie 12 Volt de la navette verte était déchargée empêchant, par exemple, l'alimentation électrique des lidars. Un voltmètre a été utilisé pour vérifier que la batterie 12 Volt était bien la source du problème. Elle a ensuite été rechargée grâce à un chargeur pour les batteries de ce type.



Figure 21 - Voltmètre attestant que la batterie 12 V est déchargée

- Personnel
Depuis décembre 2019, les tours de service ont été modifiés. Les grooms sont deux aux heures de pointe du matin et du soir pour assurer la cadence 15 minutes et un seul groom est sur site pour assurer la cadence 30 minutes le reste de la journée. Entre janvier et mars 2020, il est arrivé 4 fois que des grooms étaient malades et n'ont pas pu être remplacés. Cela implique qu'un seul groom était présent toute la journée. Afin d'assurer la cadence 15 minutes, il a donc dû utiliser le Kangoo pour faire toutes les courses officielles à l'horaire.

5. Résultats d'expériences finaux du point de vue de l'exploitant

Les résultats ont été classés dans différentes catégories : les aspects techniques, l'exploitation, les aspects sécuritaires, environnementaux, sociaux et les critères pour le futur. Ces résultats sont rapportés avec la vision de l'exploitant.

Tout d'abord, en introduction, l'ancien parcours est présenté ainsi que les véhicules pour rappel présentés afin d'avoir une meilleure compréhension des résultats. Le parcours actuel a été décrit dans le chapitre 4.

Les navettes circulent du lundi au vendredi de 6h30 à 18h30. Elles ne roulent pas les jours fériés. Dès décembre 2017, la cadence était de 30 minutes et inscrite à l'horaire. Ensuite, progressivement la cadence 15 minutes a été introduite mais cette cadence de 15 minutes est inscrite à l'horaire aux heures de pointe du matin et du soir uniquement depuis décembre 2019.

5.1.1. Rappel : Parcours 1 du 21.09.2017 au 30.09.2019

Les clients sortant du bus à l'arrêt Marly, Cité se rendent à l'arrêt Marly, Epinettes situé à 50 mètres environ. La navette circule ensuite dans le parking d'un home pour personnes âgées et sur son accès. Puis, elle pénètre dans la zone 30 du Chemin des Epinettes et franchit deux carrefours successivement. Jusqu'ici, la navette circule sur route ouverte. Elle emprunte la Route de l'Ancienne Papeterie en direction du MIC. Ce tronçon est interdit à la circulation motorisée à l'exception des navettes car la route est étroite. Deux décrochements permettent aux navettes de se croiser. Elles entrent ensuite dans le site du MIC et desservent trois arrêts internes au site que le MIC a aménagé avec des petites places d'attente. Les navettes sont équipées d'une rampe et permettent ainsi d'être accessibles par les personnes à mobilité réduite.

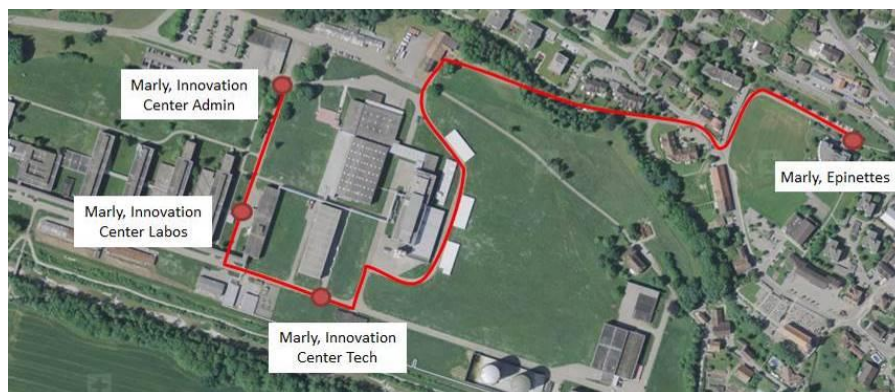


Figure 22 - Ancien tracé

5.1.2. Rappel : Descriptions des navettes

Les deux navettes sont fabriquées par le constructeur Navya et peuvent transporter 11 personnes assises et 1 opérateur debout. Le poids total maximal autorisé est de 3450 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 23 – Navette 699 rouge et Navette 698 verte

Les écrans donnant sur l'extérieur permettent de faire de l'information aux voyageurs (numéro de ligne et destination). L'écran intérieur sert aux usagers pour la sélection de leur arrêt et comme écran de contrôle pour l'opérateur.

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. Par contre, si le cycliste frôle la navette et/ou se rabat juste devant elle va s'arrêter. Ce type de freinage est plus doux qu'un freinage d'urgence. Le groom relance ensuite 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 en charge 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. Comme décrit dans le chapitre précédent. L'étape ultime du développement était de pouvoir faire en sorte que les navettes sachent où se trouvent les bus de la ligne 1 et assurer les correspondances. Malheureusement, le projet de mise en service du temps réel a été retardé au sein des TPF et n'a donc pas encore pu être appliqué dans le cadre de cette phase d'expérience.

5.2. Aspects techniques

Les navettes ne peuvent pas être considérées comme des véhicules produits en série. De ce fait, certains aspects techniques méritent des améliorations et ont causé des défaillances. Ces problèmes concernent autant la partie mécanique du véhicule que la partie logicielle. Quelques problèmes rencontrés sont présentés et un tableau résumé se trouve ci-dessous. Il s'agit des incidents les plus caractéristiques des deux ans et demi d'expérience.

Résumé des problèmes rencontrés

Catégorie	Description	Véhicule		Période					Résolution / Remarque
		Navette rouge	Navette verte	1	2	3	4	5	
Vhc méc	Capteur roue	x	x	x					Intervention sur site de Navya
Vhc méc	Amortisseur et compresseur	x	x	x	x	x	x	x	Intervention sur site de Navya
Vhc méc	Joystick	x	x	x	x	x	x	x	Changement de manette
Vhc méc	Chauffage	x		x					Intervention sur site de Navya
Vhc méc	Climatisation	x			x		x		Intervention sur site de Navya et Atelier TPF
Vhc méc	Plaque support moteur		x		x				Changement de la pièce par Navya
Vhc méc	Défaillance puissance		x		x		x		Surchauffe à cause canicule
Vhc méc	Crevaison	x	x			x	x		Intervention Atelier TPF
Vhc méc	Lidar	x	x			x	x	x	Changement de la pièce par Navya
Vhc méc	Batterie 80V	x	x	x		x			Intervention sur site Navya
Vhc méc	Batterie 12V		x				x	x	Recharge de la batterie 12 V
Vhc méc	Problème portes		x		x	x		x	Intervention sur site Navya
Vhc méc	Serrure dévissée		x			x			Intervention Atelier TPF
Vhc méc	Moteur essuies-glace	x	x		x			x	Intervention sur site Navya
Vhc méc	Girouette arrière	x			x				Intervention sur site Navya
Vhc méc	Routeur	x					x	x	Intervention sur site Navya
Vhc log	Démarrage diagrammes	x		x		x			Intervention à distance Navya
Vhc log	Diagrammes perception et vision	x	x		x	x			Intervention à distance Navya
Vhc log	Perte localisation	x	x	x	x	x	x	x	1 : Problématique pont métallique , perte signal 3G 2 : Déviation trajectoire, confusion voie de circulation 3 : Déviation trajectoire 4 : Déviation trajectoire, panne antenne Swisscom 5 : Déviation trajectoire, confusion voie de circulation
Vhc log	Pas arrêt Tech	x	x	x	x				Intervention à distance Navya

Vhc log	Bug écran contrôle	x	x	x	x				1 : Plan disparaît de l'écran 2 : Disparition bouton GO (problème diagramme décision) et écran clignote
Vhc log	Mode manuel dans la forêt	x	x	x	x				Parcours trop instable en autonome Résolution par nouvelle cartographie plus performante
Vhc log	Connexion Bestmile	x	x			x			Problèmes de connexion entre les véhicules et Bestmile, résolu entre Navya et Bestmile
Vhc log	Croisement dans forêt	x	x			x	x		Défaut dans la map corrigé avec une nouvelle cartographie
Parcours	Défaut map	x	x	x		x	x	x	1: Bodure chantier Epinettes et clignotants 3 : Croisement forêt et divers petits ajustements 4 : Modifications vitesses et trajectoires 5 : Croisement forêt et clignotants
Parcours	Véhicules mal parqués			x				x	1 : Devant home Epinettes 5 : Demi-tour arrêt Labos
Parcours	Véhicules interdiction et feux			x	x	x	x	x	
Parcours	Chantier			x	x	x	x		1 : Chantier Epinettes 2 : Chantier Epinettes et zone garage MIC 3 : Chantier Epinettes 4 : Chantier Epinettes et début travaux MIC 5 : Zone entrée MIC
Parcours	Végétation				x	x	x	x	Freinage inopinés
Autre	Prise surchauffe			x		x			Problème étudié par HEIA-FR
Autre	Antenne GNSS			x	x	x	x		Modifications des heures de redémarrages automatiques
Autre	Météo			x	x	x	x	x	

5.2.1. Exemples de quelques problèmes rencontrés

Localisation

La navette se repère grâce aux lidars et la carte de référence implémentée dans le logiciel mais également grâce à un système GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites). Une station de base a été installée par Navya sur l'un des bâtiments du MIC. Cette dernière communique avec les navettes via des fréquences radios et via le réseau mobile 3G de Swisscom. Tous ces éléments permettent d'avoir une précision de quelques centimètres.

Il arrive que la navette marque des arrêts brusques lorsqu'elle est en mode automatique. Dans une majorité des cas, la navette s'arrête car elle a perdu sa localisation. Parfois, la navette était désorientée car elle n'avait aucun repère pour ses lidars. Ceci arrivait notamment lorsqu'elle passait près du grand pré où seront construits les immeubles. Plusieurs causes ont pu être déterminées :

- Effet tunnel du secteur forêt : les hauts arbres dans le secteur forêt créent un effet « tunnel » qui entrave la réception radio et 3G pouvant ainsi provoquer des arrêts inopinés.
- Défaillance de l'antenne GNSS : chaque jour, l'antenne GNSS redémarre mais ces redémarrages ont parfois entravé son bon fonctionnement. L'antenne n'émettait donc plus d'informations et les deux navettes ne pouvaient pas rouler en mode automatique. Les grooms devaient alors aller sur le toit du bâtiment et redémarrer manuellement l'antenne. Finalement, Navya a procédé à des mises à jour et a modifié les heures de redémarrage hors des heures d'exploitation. Depuis, la situation s'est améliorée.
- Lidar défaillant : Il est aussi arrivé que les problèmes de localisation proviennent d'un lidar défaillant. Dans ce cas, Navya envoie un technicien sur site qui procède au changement du lidar. Il faut aussi noter que si les lidars sont sales, cela peut avoir un impact sur la localisation et créer des arrêts brusques. C'est pourquoi les grooms prennent bien soin de nettoyer les lidars surtout les jours où les conditions météorologiques sont mauvaises.

Un cas intéressant sur notre parcours était le franchissement du pont métallique entre l'arrêt Labos et Tech. Jusqu'en septembre 2019, la navette devait passer sous un « pont » en béton puis sous un « pont » métallique juste après un virage. Ces deux « ponts » permettent le passage d'importants tuyaux d'alimentation. Lorsque la navette passait sous le pont béton, la réception des données de localisation via la 3G et la radio était entravée et elle devait se reposer sur les lidars durant quelques brèves secondes. Ensuite, dès qu'elle était sous le pont métallique, ce sont les lidars qui étaient perturbés par le métal et la navette recevait des données erronées des lidars durant un court laps de temps également. Par conséquent, une fois sur deux la navette s'arrêtait brusquement car elle avait perdu en même temps la communication 3G et radio et recevait également des données étranges des lidars. Finalement, la solution pour résoudre ce problème a été de ralentir la vitesse de la navette afin qu'elle ait bien le temps de reconnaître son environnement que les deux bugs n'arrivent plus en même temps. Cette solution s'est avérée efficace et le problème a fini par disparaître.



Figure 24 - Pont métallique au 1er plan et pont en béton au second plan à droite

Suspensions et compresseurs

Il s'agit d'un problème purement mécanique. Les navettes se remettent à niveau en permanence. Pour ce faire, un compresseur permet d'actionner le système de suspensions. Ce système est très sollicité et par conséquent, il est arrivé sur les deux navettes que les compresseurs lâchent bloquant ainsi les suspensions. Navya est donc contraint d'intervenir sur site pour changer les pièces défectueuses.



Figure 25 - Suspension normale



Figure 26 - Problème suspension

Incident de juin 2019

Le 12 juin, la navette verte se dirige en mode automatique de l'arrêt Admin au garage. Un véhicule est mal stationné sur la route menant au garage et le groom reprend la navette en manuel pour procéder à son évitement. Lorsqu'il relance le mode automatique, la navette est mal positionnée sur sa trajectoire programmée, elle tente alors de se repositionner correctement. Malheureusement, la vitesse du roulage en manuel est conservée et n'est pas adaptée à une relance en automatique. Le rayon de braquage s'est donc retrouvé augmenté. L'avant-droit de la navette heurte un muret en béton avant que le groom ne puisse arrêter manuellement le véhicule. Les dégâts concernent uniquement la carrosserie de la navette. Les lidars ne sont pas touchés. L'opérateur était seul à bord. Suite à l'analyse de Navya, plusieurs mesures ont été rappelées aux opérateurs. Le passage en mode automatique doit toujours se faire à l'arrêt et la vitesse de conduite en mode manuel doit être plus faible que celle programmée en mode automatique. Cet incident a impliqué 10 jours d'arrêt pour la navette rouge, c'est-à-dire le temps nécessaire à Navya pour l'analyse et la confirmation que l'exploitation était sûre. Quant à la navette verte, son immobilisation a duré 22 jours pour permettre l'analyse, le contrôle des lidars ainsi que la réalisation des travaux de carrosserie.



Figure 27 - Incident du 12 juin 2019

Défaut Map

Des défauts peuvent parfois provenir de la carte implémentée dans la navette. En effet, lorsque, par exemple, les navettes s'arrêtent toujours exactement au même endroit et qu'elles détectent des obstacles qui n'est sont pas, cela peut venir d'un défaut de la map (carte). Les distances de tolérance autour de la navette sont définies et parfois celles-ci doivent être adaptées si l'environnement a changé. La programmation des clignotants, de la vitesse, de la trajectoire en courbe sont des éléments inclus dans la map. Navya peut en général procéder aux modifications à distance et rarement une nouvelle cartographie est nécessaire pour des modifications mineures.

Par exemple, lors du chantier de construction à côté du home des Epinette, une bordure en bord de chaussée a dû être démontées puis a été reconstruite. Les navettes frôlaient à chaque passage cette bordure car celle-ci avait été reposée quelques centimètres plus à l'intérieur du virage qu'initialement. La navette n'étant pas dotée d'une intelligence artificielle à proprement parler, elle n'est pas capable de se décaler seule et de retenir cette information. Navya a donc dû corriger la map en ajustant la courbe de la trajectoire.



Figure 28 – Bâtiment en chantier aux Epinettes



Figure 29 - Nouveau bâtiment aux Epinettes

5.2.2. Analyse du problème de localisation

Les TPF ont mandaté la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture du canton de Fribourg et plus particulièrement sa filière de génie électrique afin d'étudier 4 sujets posant des problèmes d'exploitation. Le premier traite de la localisation et les autres se trouvent dans le chapitre 5.5.

Les deux navettes rencontrent régulièrement des problèmes liés à la localisation provoquant des arrêts non planifiés et nécessitant l'intervention de l'opérateur pour acquitter les erreurs apparues sur le tableau de bord. Parfois les problèmes de localisation surgissent au même endroit et d'autres jours aléatoirement sur le parcours.



Figure 30 - Perte de localisation

L'objectif de cette étude est d'identifier et analyser les raisons pour lesquelles les navettes perdent leur localisation. Une antenne servant de station de base à Marly avec un récepteur GNSS a été installée sur le toit d'un bâtiment du MIC. Les navettes sont chacune équipée d'un récepteur GNSS également. Les navettes reçoivent des informations de la station de base de Marly mais également d'une station de base distante. Les informations sont communiquées via un canal radio et le réseau 3G de téléphonie mobile comme représenté sur le schéma ci-dessous. Le réseau de station de base transmet également les informations sur les corrections du signal des satellites chaque seconde. Tout ceci permet de faire circuler les navettes avec une précision de quelques centimètres.

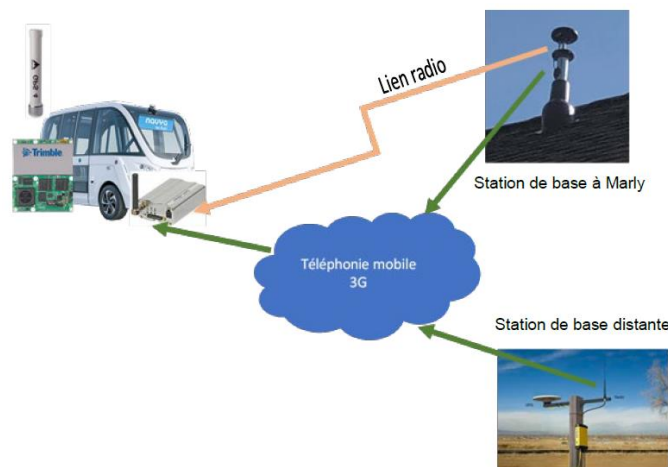


Figure 31 - Infrastructure de géo-positionnement

La HEIA-FR a obtenu de Navya un fichier contenant les données de localisation d'une navette sur une période donnée.

Leur analyse a démontré que l'utilisation des ondes radio est problématique car l'environnement n'est pas adapté. En effet, les ondes radio sont captées par les navettes à un rayon de seulement un kilomètre par rapport à l'antenne sur le toit du MIC. Dans notre cas, la communication par radio n'apporte pas de vraies plus-values. De plus, la législation suisse définit l'utilisation des fréquences péjorant la vitesse des données transmises aux navettes.

La communication par la 3G est jugée très bonne et donc totalement appropriée pour ce type de véhicules. L'analyse montre que les informations de position sont bien transmises chaque seconde aux navettes. Un point d'attention est la saturation du réseau 3G qui peut provoquer une plus grande latence et ainsi créer des problèmes de localisation. Dans le cadre des données reçues, ce n'est pas le cas mais à terme il faudra s'assurer que les opérateurs de téléphonie aient des capacités suffisantes sur leur réseau respectif.

Il y a parfois quelques instabilités concernant les données de positionnement reçues par les satellites. La réception des données de correction de position est parfois entravée dans la forêt à cause de l'environnement car moins de satellites sont disponibles. Ce comportement est gênant car il peut créer des arrêts intempestifs des navettes. Ce point pourrait être corrigé en utilisant des récepteurs plus modernes notamment car les modèles de récepteurs installés dans la station de base de Marly et dans les véhicules ne sont pas les plus récents.

A proximité des Epinettes, la station de base de Marly est trop éloignée et les informations de corrections sont reçues directement des autres stations de base. Le passage de l'un à l'autre se déroule correctement dans notre cas mais il peut dégrader la précision de localisation et poser des problèmes dans d'autres situations.

5.3. Exploitation

Outre les problèmes techniques, d'autres éléments ont perturbé l'exploitation. Quelques exemples représentatifs sont également donnés ci-dessous. Ensuite, les données récoltées par les grooms et Bestmile sont analysées sur l'entier des deux ans et demi d'essai. La gestion de l'entretien et des perturbations sont aussi évoqués avant conclure avec les conditions limites d'utilisation qui ont été définies sur la base des problèmes rencontrés.

5.3.1. Exemples de quelques problèmes rencontrés

Météo

Les conditions météorologiques se sont rapidement avérées être problématiques pour une exploitation fiable des deux navettes automatisées. En effet, les gouttes de pluie et les flocons de neige sont parfois détectés comme des obstacles et par conséquent, les navettes s'arrêtent sans cesse. De plus, il arrive que les flocons de neige ou la pluie entravent la perception des lidars et il est donc nécessaire de les nettoyer pour y remédier. Lors d'épisodes de neige, le principal souci est la chaussée glissante voire verglacée. C'est pourquoi, dans ces cas-là, les navettes restent au garage et les grooms assurent les prestations avec le Kangoo. La sécurité des passagers reste prioritaire. Durant l'hiver 2018-2019, il y avait eu passablement de neige et les températures négatives avaient persisté. Donc, les tas de neige formés après le déneigement ne fondaient pas et empêchaient les navettes de circuler en mode automatique. Les jours de forts vents peuvent aussi être contraignants. En effet, par exemple, les barrières de chantier étaient tombées et quelques branches d'arbres également donc pour des raisons de sécurité les courses sont assurées en Kangoo le temps que la situation revienne à la normale.

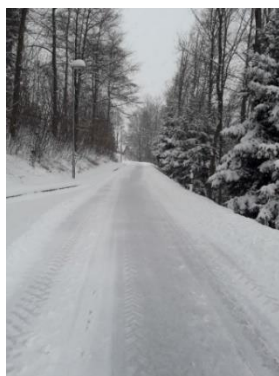


Figure 32 - Jour de neige

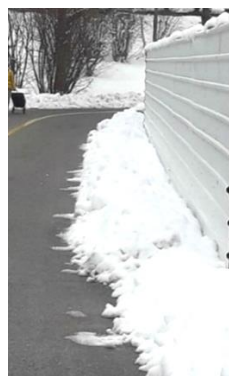


Figure 33 – Tas de neige problématique

Végétation

Dans les études préliminaires à l'expérimentation, la végétation n'avait pas été identifiée comme un risque pour l'exploitation. Mais, une fois sur place avec les véhicules, il s'est rapidement avéré que le secteur Forêt n'était pas franchissable en mode automatique. Durant les premiers mois, les navettes parvenaient à circuler automatiquement mais très lentement dans la forêt. Mais en hiver, la végétation avait trop changé et les navettes étaient complètement « perdues » car les

repères de sa carte 3D ne correspondaient plus à la vision des lidars. Durant environ une année, les grooms ont franchi ce secteur en mode manuel afin de garantir la sécurité des clients. Puis en novembre 2018, Navya a procédé à une mise à jour complète de la carte. Ils ont amélioré la qualité de la carte 3D avec plus de points de repère et enfin le secteur de la forêt peut être traversé automatiquement. La commune de Marly et le MIC entretiennent régulièrement le secteur et les navettes parviennent à circuler de manière fiable. En novembre 2019, la vitesse a pu être augmentée. La situation est parfois encore difficile à l'entrée du secteur Zone 30, car des haies privées longent le parcours des navettes et il arrive qu'elles ne soient pas entretenues régulièrement. Des rappels sont effectués par la commune aux propriétaires privés de bien vouloir tailler leur haie. Il y en a aussi une au niveau du home des Epinettes mais heureusement leur personnel d'entretien la taille régulièrement.

Outre le secteur forêt, au printemps, l'herbe est haute sur le site du MIC et du coup, de l'herbe bouge au gré du vent empiétant sur la chaussée. Ces herbes sont parfois considérées comme des obstacles par la navette provoquant des arrêts brusques et inopinés. Le personnel du MIC assure le débroussaillage des bords de chaussée afin d'éviter les déconvenues.



Figure 34 - Secteur Forêt



Figure 35 - Végétation encombrante

Autres véhicules (cf. chapitre 5.6)

Une autre problématique récurrente et indépendante de notre volonté est le comportement des automobilistes. Il arrive malheureusement régulièrement que des véhicules franchissent l'interdiction de circuler dans le secteur forêt entravant la bonne exploitation des navettes car la zone de croisement est étroite. Plusieurs véhicules ont aussi franchi les feux au rouge dans le secteur Zone 30. Avec le concours de la police cantonale et locale, les récalcitrants ont pu être sensibilisés. La circulation des navettes a aussi été entravée par des véhicules mal parkés devant le home des Epinettes empêchant les navettes de faire demi-tour. Des problèmes de stationnement sur le MIC ont pu être résolus via des communications destinées aux locataires du MIC.



Figure 36 - Voiture mal parkée à l'arrêt Labos



Figure 37 - Camion ayant franchi l'interdiction de circuler

5.3.2. Analyses

Vitesse

Comme représenté sur le graphique, les vitesses moyennes sont assez similaires entre les deux navettes. Les variations peuvent résulter d'un problème sur l'un des véhicules qui a parfois dû rouler de plus nombreuses fois en manuel. Depuis novembre 2018 et l'utilisation du mode automatique sur l'entier du parcours, les vitesses moyennes ont baissé. En effet, les grooms ont tendance à rouler plus vite en manuel que la vitesse programmée en automatique. Cette dernière est de 18 km/h au maximum. Plusieurs améliorations de vitesses ont été effectuées sur le parcours surtout dès novembre 2019 mais cela n'a pas eu un grand impact sur les moyennes mensuelles. Par contre, pour les passagers, ces améliorations sont remarquées et appréciées. La vitesse moyenne sur l'ensemble des deux ans et demi est de 8.3 km/h. Entre septembre 2017 et octobre 2018, elle était de 8.9 km/h et depuis novembre 2018 à mars 2020 de 7.8 km/h. Ceci montre bien la variation entre le passage de la forêt et manuel et l'entier du parcours en automatique.

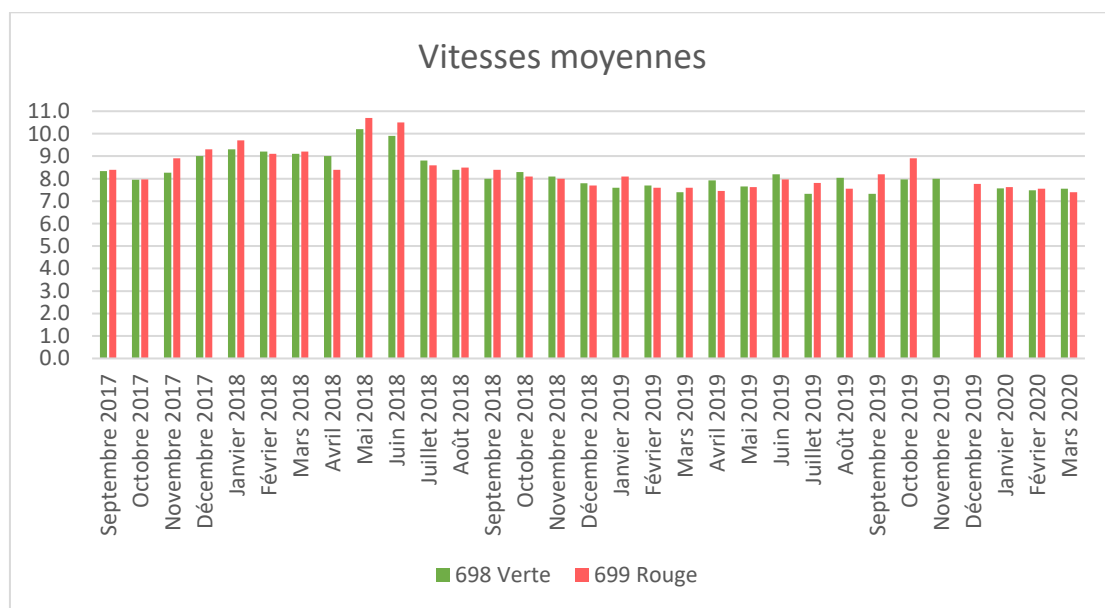


Figure 38 - Vitesses moyennes par mois

Conduite en manuel

Contrairement aux vitesses moyennes, des fortes variations de pourcentages de conduite en mode manuel peuvent être observées. Ceci est totalement dépendant des différents problèmes techniques rencontrés par chacun des véhicules. Jusqu'en novembre 2018, les pourcentages sont logiquement élevés dû au franchissement du secteur Forêt en manuel. Dès décembre 2018, une tendance à la baisse se dessine. La route d'accès au garage a été également mise en mode automatique. Depuis 2020, des progrès notables et plus stables sont constatés. En septembre et octobre 2019, les grooms ont beaucoup roulé en manuel car le chantier du MIC avait déjà impacté le parcours et la nouvelle cartographie n'avait pas eu encore lieu. Dès novembre 2019, des parois de chantiers ont été installées dans le secteur Accès MIC ce qui a permis d'améliorer fortement la fiabilité de la localisation.

La moyenne globale est de 44.7 % de conduite en manuel. Mais il est intéressant d'observer les moyennes par période. De septembre 2017 à novembre 2018, celle-ci est de 54.4 % et elle descend à 25.9 % entre décembre 2018 et août 2019. Elle remonte à 85.1 % entre septembre et novembre 2019 à cause des impacts du début du chantier au MIC. Finalement entre décembre 2019 et mars 2020, elle était de 22.5 %.

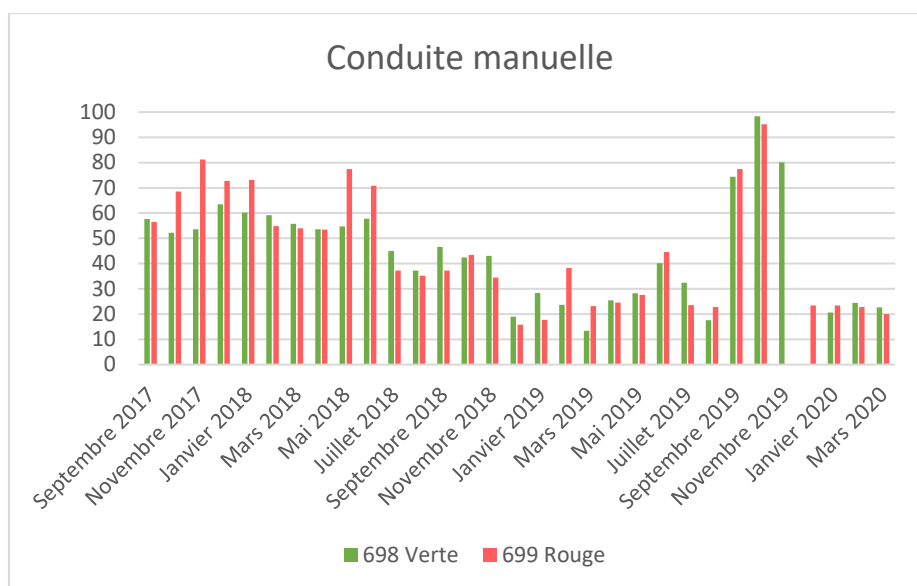


Figure 39 - Pourcentage de conduite manuelle par mois

Nombre de kilomètres parcourus

Sur le premier graphique, il peut être constaté que 70% des kilomètres ont été effectués avec les navettes automatisées et 30% avec le Kangoo. Le premier aller-retour est exécuté chaque matin avec le Kangoo permettant ainsi aux grooms de vérifier que tout est en ordre sur le parcours avant de mettre en circulation les navettes. Deux navettes sont nécessaires pour assurer la cadence 15 minutes. Il est arrivé quelques fois suite à un manque de personnel que le groom présent ait roulé avec le Kangoo pour assurer toutes les prestations. L'utilisation mensuelle est très variable car elle dépend directement des différents problèmes techniques rencontrés. Les délais d'intervention de Navya peuvent certaines fois être relativement longs, de l'ordre de plusieurs semaines. Il est observé une augmentation des kilomètres totaux de septembre 2017 à mars 2018 avant une période plus stable jusqu'en juillet 2019 excepté le mois de juin 2019 qui a été fortement impacté par l'incident expliqué au chapitre 5.2.1. Ensuite, une baisse des kilomètres mensuels peut être expliquée par le fait que le parcours a été largement raccourci passant de 1.3 kilomètres à environ 950 mètres. La circulation des navettes a été interrompue le 16 mars 2020 suite au COVID-19. Sa reprise n'est envisagée que lorsque les diverses problématiques liées au distancement social et au personnel à risque seront levées.

Au total, 48'727 kilomètres ont été effectués sur la ligne 100. Chaque navette a effectué en moyenne 36.4 kilomètres par jour d'exploitation et le Kangoo 29.5 kilomètres par jour d'exploitation.

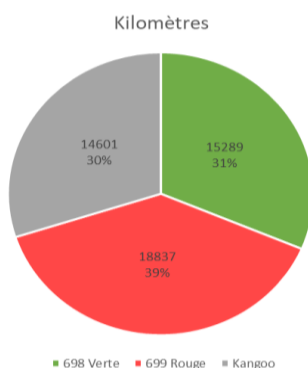


Figure 40 - Répartition des kilomètres parcourus par véhicule

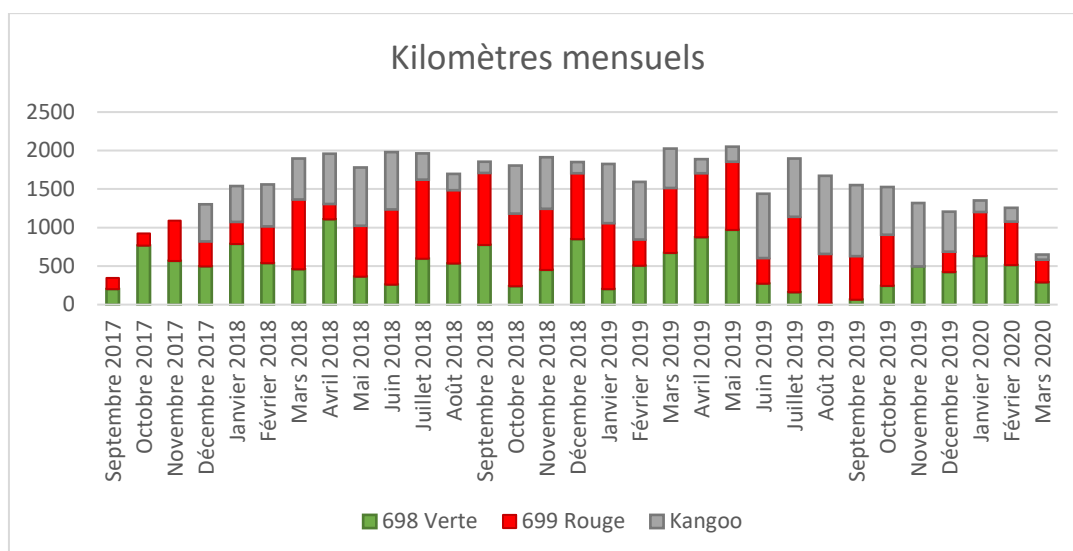


Figure 41 - Kilomètres mensuels par véhicule

Nombre de passagers transportés

Le nombre de passagers est passablement fluctuant. Les périodes creuses correspondent généralement aux périodes de vacances, c'est-à-dire les vacances estivales et de fin d'année. Une belle progression du nombre de clients a pu être observée depuis début 2020 suite à l'arrivée de nouvelles entreprises sur le site du MIC mais malheureusement ces chiffres réjouissants sont plombés par le COVID-19.

Au total, 11'468 passagers ont été transportés dont 8'980 dans les navettes automatisées. Les comptages montrent que plus de passagers empruntent la navette le soir pour remonter au centre de Marly que pour descendre au MIC le matin. Les flux de passagers se concentrent surtout sur les heures de pointe du matin et du soir et un peu sur la pause de midi. Le trafic est essentiellement pendulaire ou a pour motif des rendez-vous professionnels au MIC.

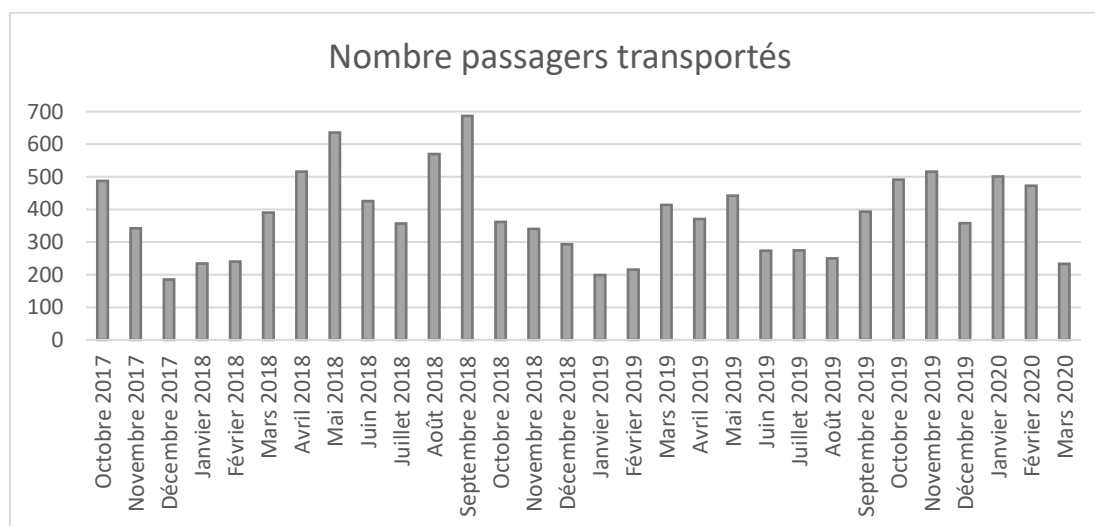


Figure 42 - Nombre de passagers transportés par mois

Gestion des perturbations

Lorsqu'un problème survient, le groom a le devoir de suivre les processus définis. Si le souci provient du véhicule, il contacte Navya via un groupe WhatsApp et si nécessaire un contact téléphonique est établi. Navya guide le groom sur la marche à suivre pour régler le problème et si besoin intervient à distance ou programme une intervention sur site. Le cas échéant, Navya décide si le véhicule peut continuer à circuler ou non. Les contacts avec Navya sont bons et au fil de l'expérience, les grooms ont gagné en autonomie pour la gestion des imprévus. Les

interventions à distance sur le logiciel sont assez rapides par contre les interventions sur site doivent parfois attendre plusieurs semaines ce qui est contraignant pour l'exploitation.

Pour un incident plus important, comme celui de juin 2019, les grooms préviennent le Centre d'exploitation des TPF et la cheffe de projet qui se charge à son tour d'avertir le Comité de Pilotage du projet et l'OFROU. L'atelier technique TPF est ensuite envoyé sur place pour remorquer la navette et procéder aux réparations de la carrosserie. Les grooms savent qui contacter dans quelles situations et s'ils ont un doute la cheffe de projet les orientent.

Entretien

Concernant l'entretien des véhicules, le MIC a mis à disposition deux locaux : un local de pause et un garage. La grande majorité des réparations ont lieu sur site dans le garage des navettes. Lorsqu'un système de levage est nécessaire, les navettes doivent être transportées sur une remorque jusqu'à l'atelier des TPF à Givisiez. Ces rapatriements sont contraignants et sont donc effectués uniquement quand cela est vraiment nécessaire. Les mécaniciens TPF interviennent pour changer des pneus ou roues et les pièces d'usure tels que les essuie-glaces par exemple ou des travaux de carrosserie. Toutes les autres interventions sont effectuées par les techniciens de Navya. Une fois par année, l'Office cantonal de la circulation et de la navigation du canton de Fribourg (OCN) procède à un contrôle technique des navettes.

Les grooms ont la responsabilité du nettoyage extérieur et intérieur des navettes. Ils sont très minutieux et les navettes sont très bien entretenues. Du temps pour ces tâches annexes est prévu dans leurs tours de service.



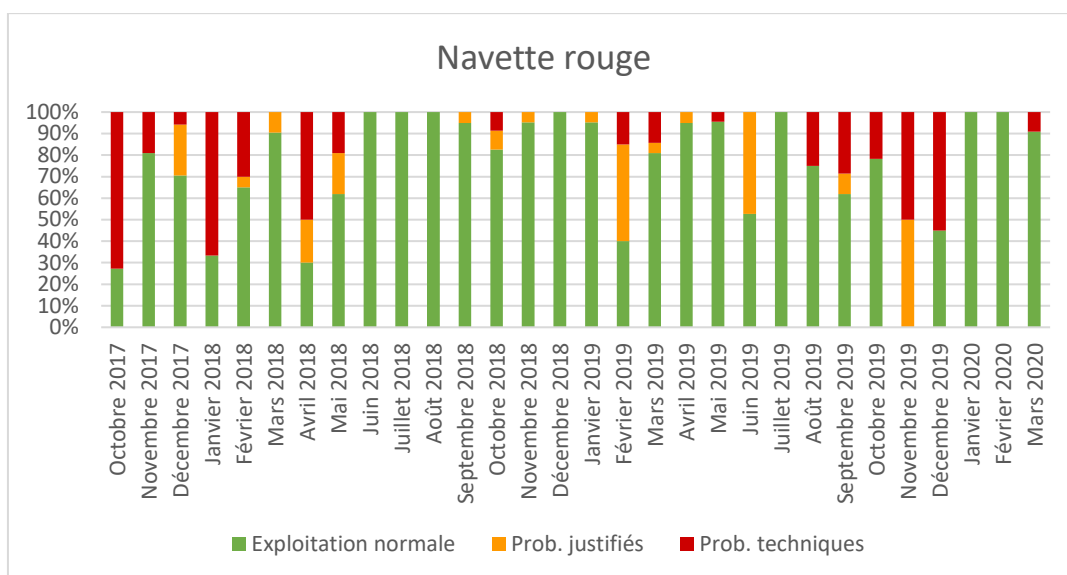
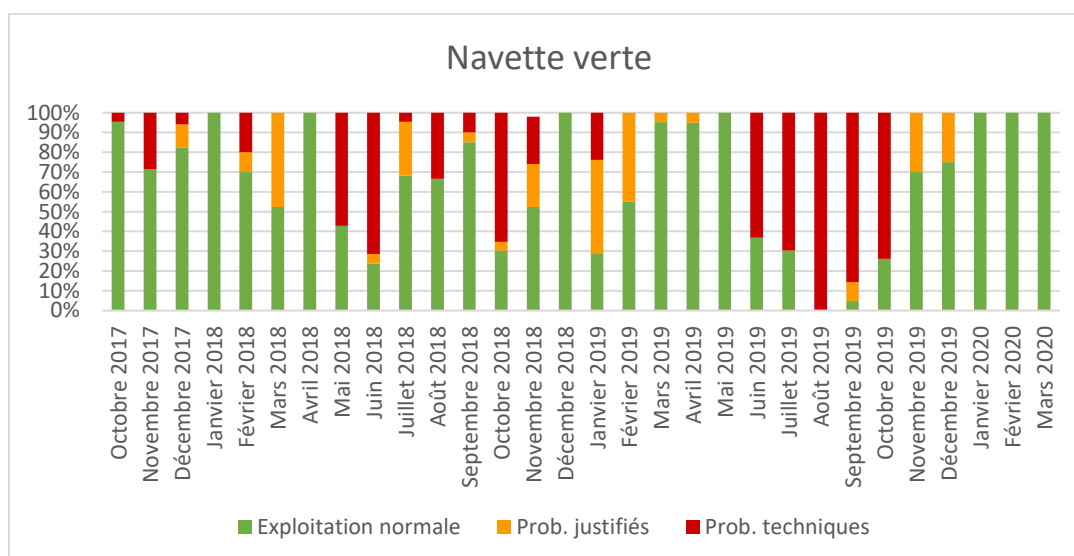
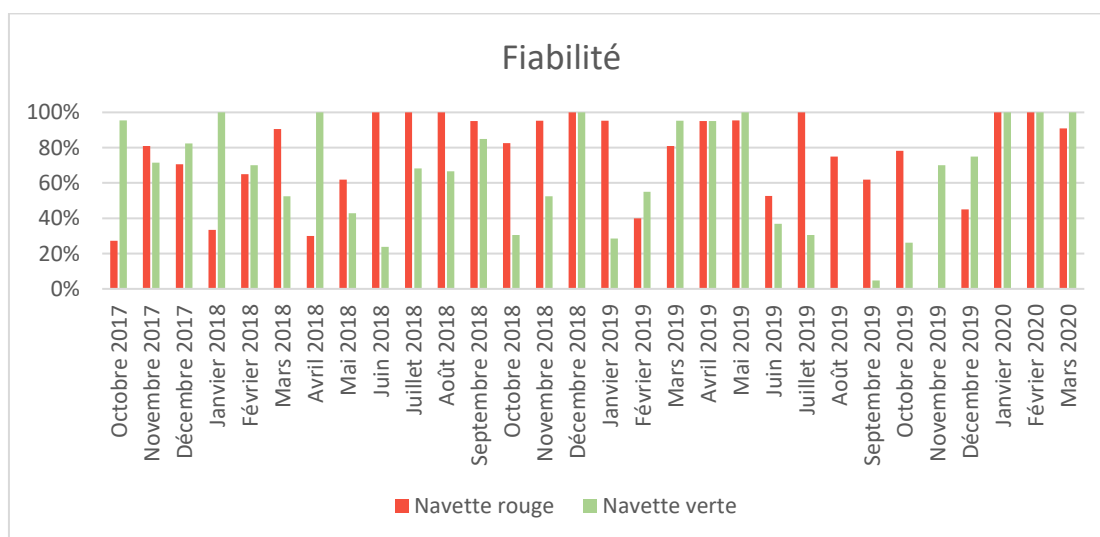
Figure 43 - Test de frein sur banc à rouleaux

Fiabilité

Le bilan est très mitigé car la fiabilité est très instable et imprévisible. Tout peut se dérouler parfaitement sur plusieurs semaines et tout d'un coup, du jour au lendemain, les problèmes s'enchaînent sur une, voire même, les deux navettes. Les graphiques ci-dessous montrent pour chaque navette les pourcentages des jours où elles ont roulé normalement, ont été immobilisées de manière justifiée (intervention sur site, météo, expertises, expositions lors d'événements, etc.) et suite à des problèmes purement techniques. Les immobilisations à cause d'un problème technique sont relativement longues et péjorent beaucoup la fiabilité des véhicules. La valeur de 100% représente l'entier des jours d'exploitation planifiés.

Les résultats 2020 sont encourageants pour le moment. L'été 2019 a été très compliqué pour la navette verte.

La moyenne globale de disponibilité des véhicules est de 70% d'exploitation normale et de 79% en prenant également en compte les arrêts d'exploitation justifiés entre octobre 2017 et mars 2020.

**Figure 44 - Fiabilité navette rouge****Figure 45 - Fiabilité navette verte****Figure 46 - Fiabilité mensuelle par véhicule**

Conditions limites d'exploitation

Cette expérimentation a permis de se rendre compte des conditions limites d'exploitation du système. Suite aux analyses des différents points précédents, les conditions suivantes peuvent être retenues :

- Conditions météorologiques
Les navettes ne doivent pas circuler en cas de chutes de neige, de verglas au sol, de fortes pluies et de forts vents pouvant provoquer la chute d'objet ou de branches d'arbre. En cas de températures supérieures à 30°C, une attention particulière doit être portée pour éviter les surchauffes du moteur.
- Qualité de la connexion radio – 3G
Pour circuler en mode automatique, les navettes doivent absolument recevoir les données transmises via les ondes radio et la 3G par la station de base sur site.
- Etat du parcours
Le parcours doit être entretenu très régulièrement, surtout la végétation. La chaussée doit être propre et déneigée pour éviter tout risque de patinage. Tout changement important de l'environnement du parcours doit être signalé afin de vérifier son impact sur la localisation des navettes.
- Limites mécaniques
Les grooms connaissent les limites mécaniques du véhicule. Par exemple, ils sont capables d'identifier un bruit suspect émanant du véhicule afin de le signaler au plus vite.
- Logiciel et comportement du véhicule par le personnel
Le personnel connaît le comportement du véhicule et la manière de fonctionner du logiciel. Ils peuvent ainsi remarquer très rapidement un comportement anormal du véhicule et reprendre la conduite en manuel si nécessaire. Les navettes ne peuvent en aucun cas circuler hors du périmètre défini dans la cartographie.
- Autonomie
L'autonomie électrique des navettes représente évidemment une condition limite d'exploitation. Ce point est développé dans le chapitre 5.5.

5.4. Aspects sécuritaires

Les navettes sont programmées pour prendre le moins de risques possibles. Par exemple, dès qu'un potentiel obstacle est détecté, la navette s'arrête même s'il s'agit uniquement d'un brin d'herbe se balançant au gré du vent. Afin de pousser plus loin les réflexions sur les aspects sécuritaires, les TPF ont mandaté ROSAS, un centre issu de la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture du canton de Fribourg. ROSAS est actif dans les questions liées à la sécurité fonctionnelle des systèmes dans les domaines routiers, aériens et ferroviaires. Leur mandat a donc porté sur une analyse de la sécurité fonctionnelle des navettes Navya selon la norme ISO 26262, la cyber sécurité et les aspects juridiques en lien avec ce type de véhicules. L'étude n'a pas été simple à mener car il est difficile d'obtenir certaines informations pouvant être confidentielles de la part du constructeur. Malgré tout, ROSAS a pu mener à bien son analyse et fournir des résultats très intéressants.

Concernant la sécurité fonctionnelle, ROSAS a procédé l'analyse des différents systèmes des véhicules et a identifié les risques possibles. Les ingénieurs ont également pu établir les exigences minimales requises à ce sujet qui pourraient ainsi être intégrées dans un cahier des charges du véhicule du futur. Pour la cyber sécurité, ils ont procédé à différentes mesures directement sur la navette. Ils ont pu ainsi définir les caractéristiques de chaque appareil

informatique connecté. Des failles en matière de sécurité informatique ont été identifiées et devront absolument être résolues pour garantir que les véhicules ne peuvent pas être l'objet d'attaques mal intentionnées. Finalement, plusieurs aspects juridiques ont pu être identifiés. Un état des connaissances a été fourni sur les questions liées aux responsabilités en cas d'accidents, aux assurances et à la récolte et à la protection des données. Enormément de points doivent encore être clarifiés avant que des véhicules totalement autonomes soient en circulation sur route ouverte en Suisse et sans personnel d'accompagnement à bord.

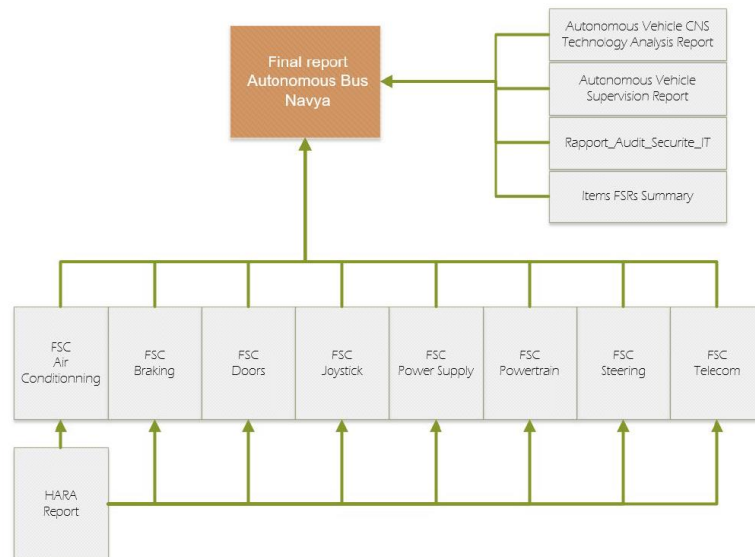


Figure 47 - Vue d'ensemble des systèmes

5.5. Aspects environnementaux

Les véhicules sont chargés toutes les nuits entre 18h30 et 6h30 dans leur garage par une prise que le groom met à la fin de son service. Il faut environ 4 heures pour recharger totalement le véhicule déchargé. Malheureusement, l'autonomie actuelle des batteries ne suffit pas pour assurer 12 heures d'exploitation. Chaque navette doit donc être rechargée au minimum une fois de 1.5 à 2 heures par jour. Mais il est toutefois arrivé que certains jours où ni le chauffage ni la climatisation n'était nécessaire, les navettes sont parvenues à tenir les 12 heures d'exploitation sans recharge. En principe, les navettes ne sont pas déchargées en dessous de 30 % afin de ne pas préteriter la durée de vie des batteries. Le chauffage et la climatisation consomment beaucoup d'énergie et les grooms font donc attention à les utiliser de manière rationnelle.

La filière de génie électrique de la HEIA-FR a été mandatée pour étudier différents aspects. Le premier concernait la localisation et est expliqué au chapitre 5.2.2. Les autres mandats concernent plus particulièrement l'autonomie des batteries, la consommation électrique et l'analyse du problème d'échauffement dans le câblage.

5.5.1. Analyse et mesure de surchauffe dans le câblage

Suite à une surchauffe de la prise de recharge de l'un des véhicule, l'HEIA-FR a proposé de mesurer grâce à une caméra thermique l'échauffement du système électrique. Suivant le résultat, des propositions d'améliorations seront émises.

Aucun échauffement excessif n'a été remarqué dans le câblage de la navette ce qui est donc positif. Par contre, le connecteur de la prise mobile était en mauvais état. Il a donc dû être remplacé par un professionnel.



Figure 48 - Echauffement du câble après 15 minutes

5.5.2. Analyse de l'autonomie des batteries

Il est difficile pour les opérateurs de gérer la température intérieure du véhicule. De par sa taille, chaque ouverture des portes provoque un échange de chaleur important entre l'intérieur et l'extérieur du véhicule. Et force est de constater que la température programmée dans la navette a un fort impact sur le niveau de batterie.

Afin d'optimiser encore plus efficacement l'énergie utilisée, il était prévu d'effectuer des mesures des différents consommateurs (climatisation, chauffage, traction, etc.). Ceci aurait permis de donner des conseils d'exploitation aux opérateurs afin d'éviter au maximum le gaspillage d'énergie électrique et trouver le bon compromis entre confort et économie. Malheureusement, quelques mesures générales ont pu être effectuées par la HEIA-FR mais elles n'ont pas pu être analysées car, pour des raisons de confidentialité concernant les composants utilisés et leur architecture, Navya n'a pas fourni toutes les informations nécessaires pour permettre une analyse réaliste de la consommation d'énergie de chaque consommateur.

Toutefois, afin de se rendre compte de l'évolution de l'autonomie globale durant cette première phase d'essai, les grooms ont relevé les pourcentages d'autonomie au fil des jours. Grâce à ces données, il a été possible de voir si en plus de deux ans, les décharges et recharges avaient conservé le même comportement. Les courbes ci-dessous représentent le pourcentage de batterie par rapport au temps depuis lequel la navette est en exploitation. Les pentes négatives correspondent aux décharges tandis que les pentes positives aux recharges. Les données sont représentées par saison. Les lignes rouges représentent la navette rouge et les lignes vertes la navette verte.

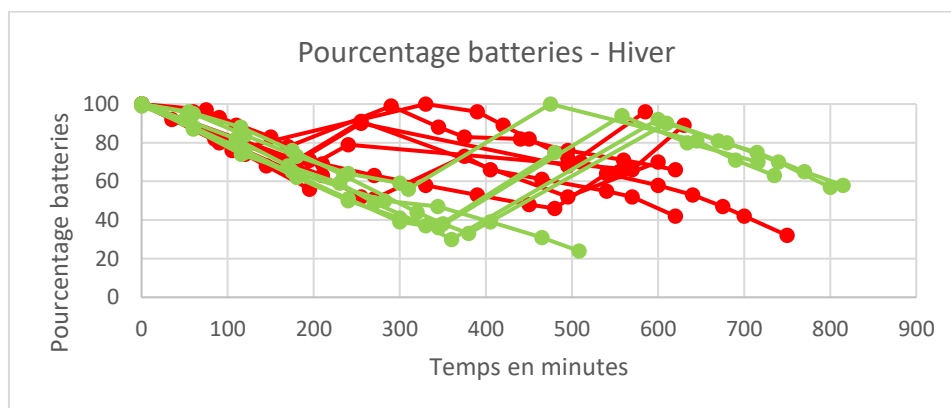


Figure 49 - Graphique décharge et recharge batteries - Hiver

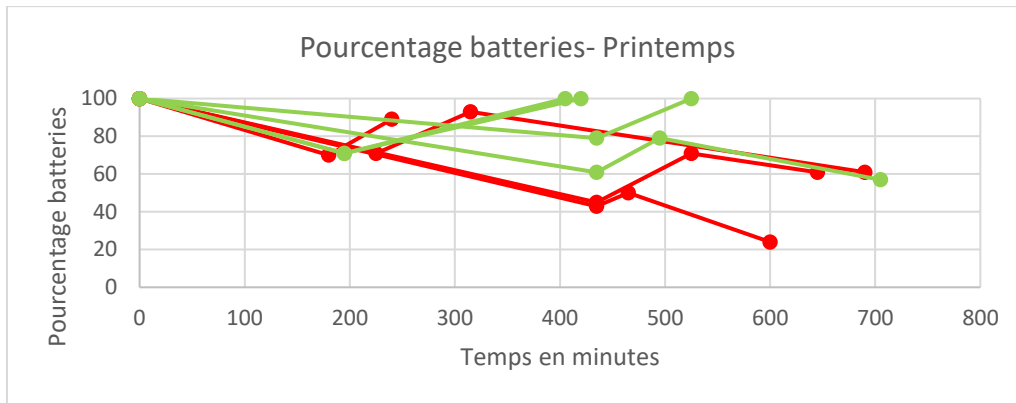


Figure 50 - Graphique décharge et recharge batteries - Printemps

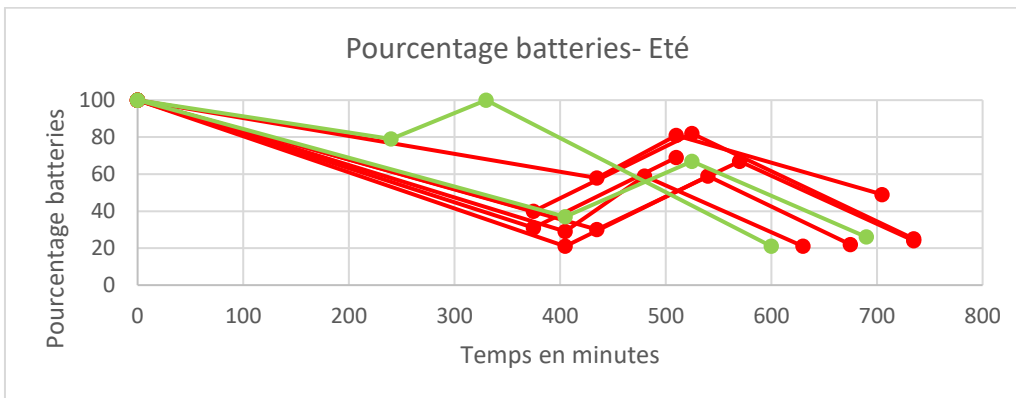


Figure 51 - Graphique décharge et recharge batteries – Été

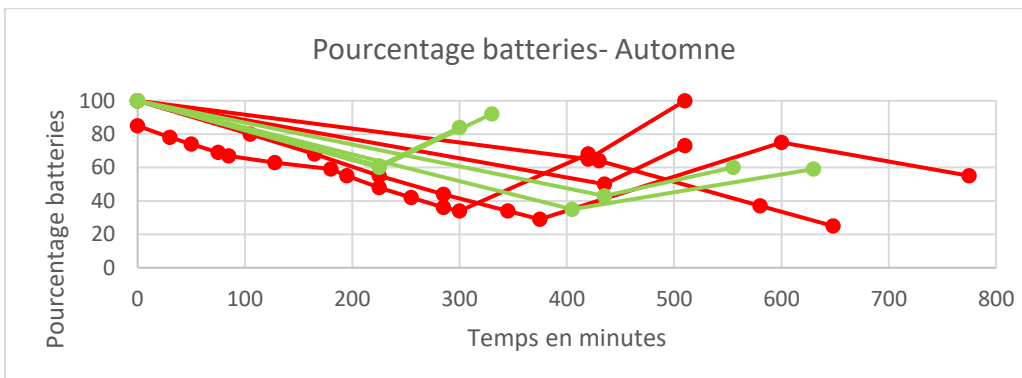


Figure 52 - Graphique décharge et recharge batteries - Automne

Il peut être constaté qu'en hiver les pentes de décharges sont très éparpillées et les données de la navette verte sont plus cohérentes entre elles. La décharge est rapide car le chauffage est fortement sollicité. Ce même constat peut être appliqué à l'été avec l'utilisation de la climatisation. Par contre pour cette saison, les données sont très similaires entre elles. La vitesse de décharge est légèrement inférieure à l'hiver. Mais il n'y a pas assez de données pour effectuer une vraie comparaison. Le printemps et l'automne sont aussi très similaires avec des vitesses de décharges éparpillées. Ceci s'explique par le fait que la climatisation et le chauffage sont utilisés certains jours et pas d'autres. Les décharges sont tout de même plus modérées qu'en hiver et en été. Chaque navette a subi un changement de batteries et il peut être constaté que les charges ont été plus performantes ensuite. Les décharges n'ont quant à elle pas varié après cette réparation. Les résultats de cette analyse ne sont pas une surprise et sont cohérents.

Tableau 1 - Consommation moyenne

Saison	Moyenne Navette rouge	Moyenne Navette verte
Hiver	0.68 kWh/km	0.74 kWh/km
Printemps	0.67 kWh/km	0.54 kWh/km
Été	0.79 kWh/km	0.75 kWh/km
Automne	0.57 kWh/km	0.84 kWh/km

La consommation moyenne a été calculée selon les relevés des pourcentages de batterie restante et en approximant les kilomètres parcourus durant le laps de temps considérés.

Pour la navette rouge, sans surprise, la saison estivale a provoqué la plus grande consommation d'énergie. Étonnamment le printemps et l'hiver ont des valeurs très proches. Par contre, l'automne montre une consommation plus faible.

Pour la navette verte, les résultats sont plus surprenants. En effet, l'automne est la saison où le plus d'énergie a été consommé. L'été et l'hiver ont des moyennes très similaires ce qui est logique. Le printemps a des valeurs plus faibles. Il serait nécessaire de récolter plus de données pour vérifier ces résultats car certaines valeurs ne sont pas très cohérentes avec la logique.

À titre de comparaison, la consommation d'un bus électrique de 18 mètres est estimée à environ 3 kWh/km tandis que celui d'une voiture électrique de type Renault Zoé est de 0.15 kWh/km selon les informations données par le constructeur. Les navettes sont lourdes et n'ont pas une conception optimale et donc la consommation est relativement élevée par rapport à la taille du véhicule.

Une proposition d'amélioration serait que les futurs véhicules aient une meilleure construction. Par exemple, des vitres plus teintées et qui laissent moins de rayons UV entrer pourraient peut-être éviter une surchauffe de l'air intérieur qui devient vite irrespirable pour le personnel et les clients en été. Actuellement, du temps est prévu pour les recharges des véhicules en cours de journée mais il est clair que ce n'est pas optimal pour l'exploitation. Le problème est qu'il est difficilement envisageable de transporter plus de batteries pour gagner en autonomie car le véhicule est déjà très lourd pour sa taille. Il est toutefois espéré que des batteries plus performantes et plus légères seront sur le marché d'ici quelques années.

Afin d'optimiser le temps de recharge et éviter d'immobiliser totalement un véhicule entre 1 et 2 heures en milieu de journée, les recharges rapides pourraient être une solution. Des systèmes de recharge par induction pourraient être installés aux terminus permettant ainsi aux navettes de se recharger durant les temps d'attente. Malheureusement, ce système est très cher à installer et nécessite des travaux conséquents dans la chaussée. Les frais d'électricité se montent à environ 4'500 CHF par année pour les deux véhicules ce qui est relativement faible.

5.6. Aspects sociaux

Les aspects sociaux peuvent être séparés en deux catégories dans le cas de cet essai : les usagers et le personnel TPF.

5.6.1. Usagers

Cette catégorie concerne autant les passagers des navettes que les usagers d'autres moyens de transports étant confrontés à la présence des navettes.

Tout d'abord concernant les automobilistes, il s'agit certainement des plus indisciplinés et difficiles à gérer. En effet, sur le parcours, il y a des feux de signalisation et une interdiction de circuler sur le tronçon dans la forêt. Les premiers mois, beaucoup d'infractions ont été constatées avec parfois un agacement de la part des conducteurs à l'égard des grooms. Avec le soutien de la police cantonale et locale, les automobilistes ont été sensibilisés et finalement une cohabitation satisfaisante a été trouvée avec les riverains. Malheureusement, l'interdiction de circuler n'est

pas intégrée dans les différents systèmes de navigation par GPS embarqués et il arrive encore souvent que des voitures voir même des poids lourds se retrouvent en situation délicate sur cette route étroite. De plus, les travaux du chantier du MIC ne permettent pas aux camions de passer et ils sont donc contraints de faire des manœuvres périlleuses pour rebrousser chemin.

Le partage des espaces avec les vélos et piétons a été plus aisé. En effet, il est plus facile pour le groom d'avoir un contact visuel et de guider les gens avec des signes. En général, quelques explications sur les spécificités de circulation des navettes permettent de sensibiliser les piétons et vélos (sensibilité de perception des obstacles et zones de détection autour des navettes). Finalement, le seul problème avec les piétons est que parfois ils n'entendent pas la navette se trouvant derrière eux car elle est trop silencieuse. Un bruit de clochette a été ajouté et permet de prévenir les piétons de façon moins agressive que le klaxon standard. Il est aussi amusant de noter que les résidents du home pour personnes âgées se trouvant au terminus des Epinettes ont accueilli très positivement ces véhicules futuristes. Plusieurs d'entre eux ont même testé quelques allers-retours avec une grande curiosité et plein d'espoir quant à la possibilité de pouvoir retrouver un peu de mobilité.

Concernant les passagers des navettes, deux sondages ont été effectués. Le premier a eu lieu entre novembre et décembre 2017 et le second en avril 2019. Les résultats détaillés se trouvent dans les rapports de suivi de la HEIA-FR. Mais les éléments suivants sont particulièrement intéressants :

Lors de la première campagne de sondage, la moitié des personnes interrogées ont emprunté la navette par curiosité tandis qu'en 2019, presque 70 % des déplacements en navettes sont effectués pour des raisons professionnelles.

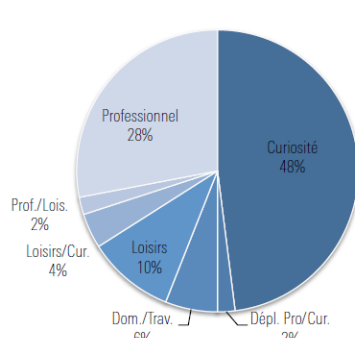


Figure 53 - Motif déplacement Sondage 1

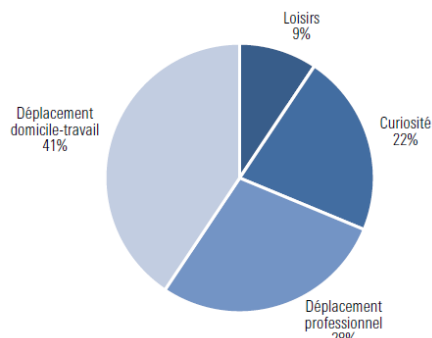


Figure 54 - Motif déplacement Sondage 2

La question a été posée de savoir si les passagers étaient prêts à voyager dans les navettes sans la présence du groom. En décembre 2017, ils sont 75 % à répondre oui alors qu'en 2019, ils ne sont plus que 41%. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'au début beaucoup de passagers sont enthousiastes et ont une bonne première impression des navettes. En 2019, les passagers sont plutôt des pendulaires et ceux-ci sont eux-mêmes confrontés régulièrement aux difficultés rencontrées par les navettes. Ils se rendent donc bien compte qu'un groom est encore nécessaire car la technologie n'est pas assez mature.

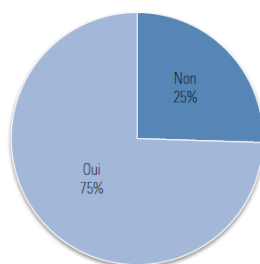


Figure 55 - Circulation sans groom Sondage 1

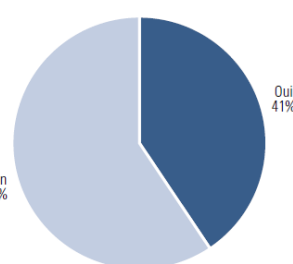


Figure 56 - Circulation sans groom Sondage 2

5.6.2. Personnel TPF

La formation et les expériences vécues par les grooms constituent des données très intéressantes sur les aspects sociaux. Un premier groupe de grooms a été formé au mois de septembre 2017 avec une première partie théorique puis des exercices pratiques et des mises en situation réelle. Par la suite, d'autres grooms les ont rejoints en suivant la même formation et avec pour avantage de pouvoir profiter des expériences déjà vécues par leurs collègues. A l'arrivée d'un nouveau groom, après la formation de base, celui-ci suit durant 1 à 2 semaines l'un de ses collègues avant d'être laissé seul dans le véhicule. Navya a également donné une formation aux grooms comme compléments et pour rafraîchir certains aspects en septembre 2018.

Les grooms sont des piliers de cette expérience car ils sont des porte-paroles du projet et sont directement aux contacts de la clientèle. Si les grooms sont à l'aise et font confiance à la technologie, les clients se sentiront alors en sécurité. Les TPF ont eu la chance d'avoir du personnel motivé et souhaitant être des ambassadeurs. Les clients ont fait part de nombreux retours positifs à leur égard ce qui est vraiment primordial pour une expérience innovante. Il ne faut pas oublier, de plus, que les grooms ont dû sortir de leur zone de confort pour s'adapter à ces engins d'un nouveau type avec les aléas inhérents. Cette expérience a également permis de réinsérer des chauffeurs qui ne pouvaient plus conduire des bus classiques ou avaient perdu confiance dans leurs moyens.

Ci-dessous, le témoignage d'Evelyne, l'une de nos grooms, sur son expérience vécue depuis plus de deux ans :

« Petite description de nos navettes P27 et P40 surnommées affectueusement les Choupettes par mes collègues et moi-même, ainsi que de mon travail avec ces véhicules.

En septembre 2017 j'ai eu la chance de pouvoir participer à une aventure peu ordinaire dans mon quotidien de conductrice au sein des Tpf : l'exploitation de deux navettes autonomes sur le site du MIC à Marly.

Le travail effectué dès ce moment-là est une tâche gratifiante au sein d'une petite équipe très impliquée et épaulée par notre chargée de projet. Nous assurons la ligne 100 qui dessert le MIC et la clientèle, très diversifiée, se montre compréhensive lorsque nous rencontrons de petits soucis dûs à la jeunesse de nos prototypes. Pour ma part, j'apprécie énormément le côté relations-humaines avec cette clientèle dont nous avons appris, parfois le prénom et souvent le secteur de travail.

Si, au départ, nous avons rencontré des difficultés et des soucis pour gérer les imprévus de nos navettes, les choses s'améliorent nettement. Et grâce à ces imprévus, justement, nos progrès ne sont pas foudroyants mais presque. Quelle ne fut pas ma joie lorsqu'enfin nos « choupettes » furent capables d'effectuer le parcours entier sans aide manuelle et qu'elles rentrèrent seules se ranger dans leur garage ! Pour ma part je fus, ce jour-là, aussi fière que si j'avais conçu moi-même nos petites navettes !

Bien sûr, il y a des jours où tout semble aller de travers, mais cela donne un sens encore plus aigu à ma mission qui consiste à faire évoluer le développement de ces véhicules. J'ai été obligée de me remémorer mes notions d'anglais afin de déchiffrer les messages transmis par l'ordinateur afin de renseigner correctement la Supervision du constructeur Navya. Que du positif, vous dis-je !

On pourrait penser que j'embellis les choses ? Je ne le crois pas et pour rien au monde je ne voudrais abandonner cette fabuleuse aventure car il s'agit bien d'une aventure aussi bien humaine que matérielle.

Aventure humaine dans ma relation avec nos passagers, avec les services d'entretien de la commune et du MIC, avec les visiteurs-découvreurs de nos navettes, et avec notre chargée de projet toujours à l'écoute. Et naturellement aussi avec les différents contacts chez Navya !

Aventure matérielle aussi, qui nous amène parfois à devoir stopper temporairement le service afin de résoudre quelques petits soucis, tant sur les ordinateurs que sur la partie mécanique. Mais

grâce à tout cela, ma journée n'est jamais monotone. Pour quelqu'un qui n'aime pas la routine, j'ai été gâtée et je m'estime privilégiée de pouvoir œuvrer chaque jour dans cet état d'esprit. Un point négatif ? J'attends impatiemment la fin de la crise covid-19 afin de retrouver mes petites choupettes et mes collègues. »

Evelyne Salemi-Rosat, groom, Avril 2020

5.7. Aspects économiques

Afin de se rendre compte des aspects économiques de cette nouvelle technologie, quelques chiffres clés concernant les coûts d'investissement se trouvent dans le tableau ci-dessous. Ces coûts sont les coûts actuels sans prise d'une éventuelle baisse des prix suite à une augmentation de production.

Tableau 2 – Coûts d'investissement principaux

Prix par véhicule	250'000 CHF
Cartographie (estimation pour parcours d'un kilomètre)	12'000 CHF
Station de base à installer sur site	10'000 CHF
Autorisations et frais en lien avec l'homologation	35'000 CHF

Evidemment, il est espéré que les coûts d'autorisation et les frais en lien avec l'homologation diminueront drastiquement lorsque le cadre légal sera adapté et que chaque véhicule n'aura plus besoin d'une homologation particulière comme aujourd'hui. Dans le cadre de l'essai de Marly, les coûts les plus importants concernaient les études autour de l'expérience soit à l'interne TPF, via la HEIA-FR ou Bestmile.

Les coûts d'exploitation ont été simplifiés. En effet, pour faciliter la compréhension et l'analyse, les coûts d'exploitation prennent en compte uniquement les catégories suivantes : Amortissement du véhicule, coûts d'entretien (Navya et TPF), coûts de licences, logiciel et supervision, les coûts d'énergie, de télécommunications, de taxes sur les véhicules (impôts, assurances) et de personnel.

Les coûts d'exploitation annuels simplifiés se montent à environ 270'000 CHF par véhicule. Ces coûts sont très élevés et peuvent s'expliquer par le fait notamment que les véhicules ne sont amortis ici que sur 5 ans alors que les bus conventionnels sont amortis sur 10 à 12 ans. Les coûts de prestations de service avec Navya sont également conséquents et ont un fort impact sur les coûts d'exploitation. Les coûts du personnel représentent un peu plus de 60 % de cette estimation simplifiée des coûts d'exploitation.

Tableau 3 - Répartition des coûts d'exploitation simplifiés

Amortissement véhicules	19 %
Prestations de service	17 %
Personnel	61 %
Energie	1 %
Réparation et entretien par TPF	2 %

Aujourd'hui, ces coûts ne sont pas supportables pour la collectivité pour une si petite ligne qui n'atteint pas un grand nombre de clients potentiels. Par contre, si les véhicules deviennent parfaitement autonomes sans personnel accompagnant, le modèle pourrait s'avérer intéressant. Mais attention, il faudra du personnel qui surveille les véhicules autonomes à distance. Donc, si on considère une présence de 6h30 à 18h30 tous les jours ouvrables, cela représente environ : 3000 heures par année. On peut supposer qu'une personne s'occupe de 8¹ véhicules autonomes

¹ Attention, l'hypothèse de 8 véhicules doit être vérifiée. Des réflexions seront menées à ce sujet dans la phase 2 du projet (voir chapitre 6.2)

en même temps. Ainsi cela pourrait potentiellement représenter une charge de 75'000 CHF annuellement. Cela réduit les coûts du personnel de surveillance à environ 26% du total tandis que l'amortissement représenterait 35 % et les prestations de Navya 17%.

5.8. Critères pour une exploitation future

Après ces plus de deux années de test, les TPF ont pu clairement identifier les critères principaux pour lesquels une attention particulière doit être portée en cas de volonté de mettre en place une nouvelle exploitation de véhicules autonomes.

- **Parcours**
La première tâche à réaliser pour tout nouveau projet d'exploitation de véhicules autonomes est d'analyser le parcours. Tant qu'une cartographie préalable est nécessaire, les points de repères fixes doivent être clairement identifiés et être suffisants en nombre. Si des changements à courts terme de l'environnement sont connus, il est également nécessaire d'en tenir compte. La qualité de réception du signal 3G est aussi importante. Les environnements avec une végétation conséquente sont à éviter. La densité de circulation doit aussi être prise en compte car si le trafic est dense la navette peut avoir des problèmes d'insertion dans les carrefours par exemple. Il est plutôt recommandé de choisir un itinéraire où la circulation automobile est moins importante. Dans les carrefours, la gestion des priorités peut aussi engendrer des difficultés de circulation pour les navettes. Si possible, la navette devrait pouvoir commander les feux de signalisation pour avoir la priorité. La signalisation peut également être modifiée pour accorder la priorité aux navettes par exemple une priorité peut éventuellement être modifiée avec des céder le passage. Les observations actuelles montrent qu'une séparation des flux améliore nettement l'exploitation. En raison de la vitesse commerciale limitée, les longues relations ne sont pas adaptées aux navettes actuelles. La ligne ne doit pas être soumise à d'importants pics de demande (trafic scolaire par exemple), en raison de la capacité limitée des véhicules.
- **Véhicules**
Avant l'achat de véhicules autonomes, il est nécessaire de pouvoir voir et tester le véhicule. Des techniciens doivent apprécier si les parties mécaniques sont de bonne qualité. Les prestations de services entre le constructeur et l'exploitant doivent être clairement établies. Dans la mesure du possible, le personnel technique de l'exploitant devrait avoir une formation pour être capable de réparer un grand nombre de pannes. Les questions liées au logiciel peuvent continuer d'être traitées par le constructeur à distance. Par contre, tant que le parcours doit être cartographié, il est nécessaire de bien convenir avec le constructeur des modalités concernant de nouvelles cartographies. L'idéal est clairement qu'à terme, l'intelligence artificielle de la navette soit assez performante pour intégrer les modifications mineures (végétation changeante, nouveau mobilier urbain, etc.).
- **Aspects légaux**
Actuellement, les autorisations d'essai sont données par plusieurs offices fédéraux. Il est primordial de s'informer sur les aspects à respecter et prendre en compte les contraintes demandées par ces derniers. A terme, il est espéré que les lois soient modifiées afin de simplifier les processus d'homologations et d'autorisations car les véhicules autonomes seront vraiment économiquement intéressants que lorsqu'un accompagnant à bord en permanence ne sera plus obligatoire. Pour l'instant, les responsabilités sont définies sur le même modèle qu'un véhicule standard. A l'avenir, il est attendu que de nouveaux concepts soient mis au point par la branche des assurances et des constructeurs notamment.

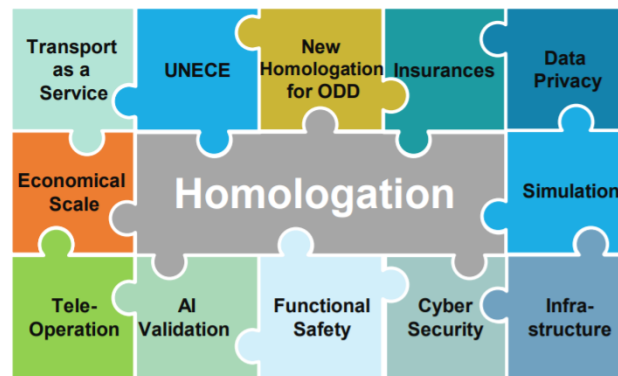


Figure 57 - Enjeux de l'homologation

- Exploitant
En tant qu'exploitant, il est primordial que les grooms soient parfaitement formés et à l'aise avec les nouvelles technologies. Une augmentation des connaissances internes permettra des interventions plus rapides sur site pour la maintenance du véhicule.

Dans un avenir proche, les TPF n'envisagent pas encore de nouvelles expérimentations de navettes automatisées. Mais la ligne 100 a permis à l'entreprise d'acquérir de nouvelles connaissances précieuses pour la mise en service de véhicules du futur quel que soit leur mode de fonctionnement. Cela a également permis de conseiller d'autres entreprises s'étant lancées dans la même expérimentation : Bernmobil (Bern), MBC (Cossonay), VBSH (Schaffhouse), etc.

6. Conclusion

6.1. Appréciation générale des TPF

Cette première phase d'expérimentation de deux navettes automatisées a été très enrichissante. Les véhicules sans chauffeur offrent des perspectives très intéressantes pour permettre le déplacement des personnes n'ayant pas de permis de conduire mais aussi économiquement pour mettre en place des services de transports collectifs dans des zones peu peuplées ou décentralisées. L'analyse des résultats démontre que des améliorations sont encore nécessaires avant une exploitation à plus grande échelle. L'intérêt de l'essai est que maintenant les points critiques sont connus. Ce test a aussi permis de se rendre compte de tous les aspects touchés par la question de l'utilisation de véhicules autonomes au sens large et les problématiques à résoudre pour aboutir à leur avènement.

Pour les TPF, le bilan est tout de même un peu mitigé car le projet avait suscité beaucoup d'enthousiasme et d'espoir sur une arrivée prochaine des véhicules autonomes. De plus, les politiques ont soutenu et porté le projet ainsi que différentes institutions cantonales lui donnant ainsi une plus grande crédibilité et importance. Après quelques mois d'exploitation, il a bien fallu remettre les pieds sur terre et accepter que la technologie nécessitait encore d'importantes améliorations. Comme décrits précédemment, les aspects techniques du véhicule doivent être revus et corrigés autant d'un point de vue mécanique que de logiciel. En effet, la fiabilité n'est pas encore suffisante pour envisager une exploitation à plus grande échelle. Afin d'éviter une exploitation perturbée, les navettes doivent être capables « d'apprendre » les modifications d'environnement. Elles doivent également être capables de circuler dans des conditions météorologiques similaires à l'utilisation d'une voiture par son conducteur à l'heure actuelle. Les vitesses moyennes de circulation ne sont, par conséquent, pas encore suffisamment attractives à ce jour. D'un point de vue environnemental, l'utilisation d'électricité n'engendre pas de pollution de l'air mais il faut toutefois veiller à ce que l'électricité provienne d'énergies renouvelables. Idéalement, les batteries devraient être produites et recyclées dans le respect de l'environnement.

Les améliorations à faire sur les navettes doivent aussi permettre de gagner en efficacité énergétique lors de l'utilisation de la climatisation ou du chauffage et ainsi assurer un niveau de confort élevé pour les passagers. Ces derniers sont au centre de l'attention des TPF et un travail doit être effectué par tous les acteurs pour faire accepter ces nouvelles technologies au grand public en les informant suffisamment. Les aspects juridiques, légaux et de responsabilités sont encore très flous et nécessitent grandement des prises de position des autorités. Economiquement, cette solution est trop chère mais à terme de nouveaux modèles d'affaires devront être développés pour être prêts lorsque la technologie aura atteint sa maturité.

Toutefois, il est primordial de souligner que cette expérience a permis d'acquérir de nombreuses connaissances qui permettront à terme de mettre en œuvre d'autres projets avec des véhicules autonomes. La veille technologique se poursuit et qui sait ce qui sera créé dans les 5 prochaines années. Un jour des véhicules avec de forts niveaux d'automatisation seront disponibles sur le marché et les TPF seront alors prêts à rester un acteur majeur du transport public en Suisse romande.

Cette expérience a permis aux TPF d'avoir une visibilité importante tant au niveau national qu'international. L'entreprise a ainsi pu se positionner en tant qu'acteur majeur de l'exploitation de véhicules automatisés dans la branche des transports publics suisses. Les médias se sont beaucoup passionnés pour le sujet qui a fait l'objet de nombreux articles de presse régionaux et nationaux et autant du côté romand que suisse-allemand. Plusieurs reportages télévisés ont également été tournés pour les chaînes nationales telles que la RTS (Mise au point, Faut pas croire) et la SRF mais aussi pour CNN Suisse. Les TPF ont eu également de nombreuses opportunités de participer à des conférences telles que OuestRail et la conférence nationale de l'ARE. Des démonstrations et visites ont également été organisées au Marly Innovation Center pour un public aux horizons très variés comme par exemple, une section du BPA, l'UTP, des représentants des polices cantonales romandes mais également au niveau international à une entreprise de transports publics du Danemark et à des représentants d'une université en Arabie Saoudite. Ce projet a aussi permis aux TPF d'intégrer un groupe d'experts pour une étude sur les véhicules autonomes pilotées par TA-Swiss. Toute cette expérience a permis de créer de nouveaux réseaux de contacts qui seront certainement utiles dans le futur.

Dans les projets d'innovation, il faut savoir accepter les imprévus et les déceptions, se réjouir de toutes les petites victoires, persévérer et surtout retenir le positif pour continuer à imaginer et rendre concrètes les idées innovantes.

6.2. Perspectives

Cette expérience a permis d'ouvrir et de créer de nouvelles perspectives pour les TPF. En effet, une nouvelle autorisation vient d'être délivrée par le DETEC pour le lancement d'une nouvelle phase d'expérimentation pour l'essai de Marly pour deux ans maximum. Intégrer cette ligne innovante dans le réseau des TPF demeure l'objectif principal. La poursuite de l'essai permettra de récolter encore des données afin d'agréments les bases de données et les expériences. Trois axes forts seront principalement développés durant cette seconde phase d'essai :

- Cadence 7.5 minutes

Le premier axe consiste à parvenir à atteindre une cadence de 7.5 minutes avec deux navettes en circulation. Les progrès sur les vitesses depuis novembre 2019 ainsi que la réduction du pourcentage de conduite en mode manuel encouragent les TPF à continuer les efforts pour atteindre cet objectif. Cette continuité va également permettre d'acquérir de précieuses données supplémentaires en lien avec l'exploitation qui serviront notamment aux études sur la téléopération. Grâce à la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR) et au centre de compétence « Swissmoves », des simulations pourront également être effectuées afin

d'évaluer si la sécurité est garantie et l'exploitation fiable avec des augmentations de vitesse additionnelles.

- Télé-opération

L'axe fort de cette deuxième phase est la Télé-opération. En effet, nous remarquons que de très nombreuses questions se posent sur la télé-opération le jour où il n'y aura plus d'obligation légale d'avoir un opérateur à bord en permanence. Cette nouvelle phase d'essai doit permettre de définir les besoins d'un exploitant comme les TPF à travers les expériences vécues à Marly. Toujours en partenariat avec la HEIA-FR, un cahier des charges technologiques pourra être effectué pour que les constructeurs puissent intégrer dans leurs développements futurs les éléments dont la branche « transports publics » a concrètement besoin. Les évolutions de la technologie n'étant pas rapides, des simulations seront réalisées pour valider les différents éléments sur la base des données récoltées par l'essai. Ensuite, des processus clairs et précis pourront être créés pour les exploitants. Finalement, toutes les réflexions et études permettront de définir les tâches du téléopérateur du futur. Les principes de base devront impérativement s'appliquer dans le cadre d'une flotte mixte de véhicules automatisés et conventionnels et ils devront aussi répondre aux besoins spécifiques des TPF qui exploitent autant des trains que des véhicules routiers.

- Collaboration et échanges avec SmartRail 4.0

Une particularité majeure, comparée à d'autres entreprises de transports publics en Suisse, est que les TPF opèrent autant des trains (à voie normale et à voie étroite) que des bus (urbains et régionaux). Les TPF participent également au Programme « SmartRail 4.0 », notamment sur le thème des trains automatisés. Dans le but d'utiliser les connaissances acquises dans les deux domaines, cette nouvelle phase de test à Marly et ses développements vont permettre de faire des parallélismes entre les mondes routier et ferroviaire en tenant compte de la chaîne de mobilité complète. Parmi les principaux points à mettre en commun, la télé opération, la coordination entre les modes pour les correspondances ainsi que plusieurs processus peuvent être identifiés. Les TPF voient un grand intérêt à pouvoir comparer la navette automatisée et l'essai de Marly avec les réflexions en cours sur l'ATO (automatic train operation).

Suite à l'analyse de la sécurité fonctionnelle des navettes effectuée (voir chapitre 5.4), il s'est avéré nécessaire d'acquérir des compétences supplémentaires en terme de mobilité autonome. Un groupe s'est donc formé et se nomme dorénavant *Swissmoves*². Une collaboration est instaurée avec ce centre de compétences qui réunit de nombreux professionnels en matière de mobilité autonome dans les domaines routiers, aériens et ferroviaires. Le but est de mettre en commun les connaissances et expériences de chacun. Le groupe est composé des partenaires suivants : Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg ainsi que sa start-up ROSAS active dans la sécurité fonctionnelle, l'Université de Fribourg avec sa faculté de droit, CertX le seul organisme suisse de certification, la Haute Ecole de Gestion de Fribourg pour les aspects économiques ainsi que les TPF. Ce centre de compétences sera mis à contribution le développement des axes « augmentation de la vitesse » et surtout pour l'axe « télé-opération ». De plus, *Swissmoves* possède des outils de simulation qui seront très utiles pour agrémenter les réflexions. La poursuite de l'essai de Marly est une réelle opportunité pour TPF de profiter des connaissances de ce centre de compétences.

Les TPF ont intégré une seconde initiative au niveau national créée par différentes grandes entreprises de transports publics en Suisse. Des informations seront communiquées officiellement avant la fin de l'année 2020.

Les TPF sont fiers de participer activement au développement de la mobilité du futur, que ce soit par l'automatisation de la conduite, une meilleure gestion des ressources ou une simplification de la tarification tout en plaçant le client au centre des préoccupations.

² Plus d'informations sur www.swissmoves.ch

7. Table des figures

Figure 1 - Marly Innovation Center.....	4
Figure 2 – Etape 1 de construction	4
Figure 3 - Itinéraire Ligne 1.....	5
Figure 4 - Arrêts de bus avec périmètre de desserte	5
Figure 5 - Organisation interne	7
Figure 6 - Etapes du projet	8
Figure 7 - Tracé et arrêts actuels.....	8
Figure 8 - Plan secteurs parcours et localisation photos	9
Figure 9 - A) Terminus Epinettes	9
Figure 10 - B) Parking Epinettes.....	9
Figure 11 - C) Intersection zone 30.....	9
Figure 12 - D) Route Ancienne Papeterie	9
Figure 13 - E) Passage pour navettes	10
Figure 14 - F) Rampe	10
Figure 15 - Demi-tour Admin.....	10
Figure 16 - Demi-tour Labos	10
Figure 17 - Camion faisant demi-tour au niveau de l'interdiction de circuler.....	12
Figure 18 - Chutes des barrières suite aux vents tempétueux	12
Figure 19 - Voiture mal stationnée à l'arrêt Labos.....	13
Figure 20 - En haut à gauche : pas de réception GNSS	13
Figure 21 - Voltmètre attestant que la batterie 12 V est déchargée.....	14
Figure 22 - Ancien tracé	15
Figure 23 – Navette 699 rouge et Navette 698 verte.....	16
Figure 24 - Pont métallique au 1er plan et pont en béton au second plan à droite	20
Figure 25 - Suspension normale	20
Figure 26 - Problème suspension	20
Figure 27 - Incident du 12 juin 2019.....	21
Figure 28 – Bâtiment en chantier aux Epinettes.....	21
Figure 29 - Nouveau bâtiment aux Epinettes	21
Figure 30 - Perte de localisation	22
Figure 31 - Infrastructure de géo-positionnement	22
Figure 32 - Jour de neige.....	23
Figure 33 – Tas de neige problématique.....	23
Figure 34 - Secteur Forêt.....	24
Figure 35 - Végétation encombrante.....	24
Figure 36 - Voiture mal parquée à l'arrêt Labos	24
Figure 37 - Camion ayant franchi l'interdiction de circuler	24
Figure 38 - Vitesses moyennes par mois.....	25
Figure 39 - Pourcentage de conduite manuelle par mois	26
Figure 40 - Répartition des kilomètres parcourus par véhicule.....	26
Figure 41 - Kilomètres mensuels par véhicule	27
Figure 42 - Nombre de passagers transportés par mois	27
Figure 43 - Test de frein sur banc à rouleaux	28
Figure 44 - Fiabilité navette rouge	29
Figure 45 - Fiabilité navette verte.....	29
Figure 46 - Fiabilité mensuelle par véhicule	29
Figure 47 - Vue d'ensemble des systèmes	31
Figure 48 - Echauffement du câble après 15 minutes	32
Figure 49 - Graphique décharge et recharge batteries - Hiver	32
Figure 50 - Graphique décharge et recharge batteries - Printemps.....	33
Figure 51 - Graphique décharge et recharge batteries – Été	33
Figure 52 - Graphique décharge et recharge batteries - Automne	33

Figure 53 - Motif déplacement Sondage 1	35
Figure 54 - Motif déplacement Sondage 2	35
Figure 55 - Circulation sans groom Sondage 1	35
Figure 56 - Circulation sans groom Sondage 2	35
Figure 57 - Enjeux de l'homologation	39
Tableau 1 - Consommation moyenne	34
Tableau 2 – Coûts d'investissement principaux	37
Tableau 3 - Répartition des coûts d'exploitation simplifiés	37

Sources des illustrations

Figure du titre : Jo Bersier

Figure 1 et 2 : Marly Innovation Center / www.marly-innovation-center.org

Figure 4, 7, 8 et 9 : www.map.geo.admin.ch

Figure 31, 47-48, 53-57 : HEIA-FR

Toutes les autres illustrations proviennent des TPF.