

Navettes automatisées TPF à Marly

Phase 2 : Rapport intermédiaire N°3



Source : TPF | Jo Bersier

Version finale

Novembre 2021

**Document établi par les Transports publics fribourgeois et la
Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg**



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



MARLY INNOVATION CENTER

1. Table des matières

1.	TABLE DES MATIERES.....	2
2.	INTRODUCTION	3
3.	CONTEXTE	3
4.	DEVELOPPEMENTS EFFECTUES	4
4.1.	Projet Téléopération	4
4.1.1.	Activités par Workpackages	4
5.	RESULTATS D'EXPLOITATION DES NAVETTES.....	18
5.1.	Données.....	18
5.1.1.	Kilomètres	18
5.1.2.	Passagers	19
5.1.3.	Conduite manuelle et automatique	21
5.1.4.	Vitesse moyenne	22
5.2.	Exploitation.....	22
5.2.1.	Facteurs externes.....	22
5.2.2.	Problèmes techniques	24
5.3.	Appréciation générale de l'exploitant	26
6.	DEVELOPPEMENTS FUTURS	26
7.	CONCLUSION	27
8.	TABLES DES FIGURES.....	27

2. Introduction

Pour cette nouvelle phase du projet des navettes automatisées des TPF à Marly, les Transports publics fribourgeois (TPF) continuent leur collaboration avec la Haute Ecole d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR) pour l'élaboration des rapports d'expériences publiés tous les 6 mois par l'Office fédéral des Routes (OFROU).

Toutes les informations sont regroupées dans un seul rapport élaboré conjointement par les deux entités. La HEIA-FR apporte ainsi sa vision académique et scientifique tandis que les TPF peuvent faire état de l'exploitation concrète rencontrée sur le site du Marly Innovation Center (MIC). Tout d'abord, une explication du contexte permet de rappeler le cadre du projet. Ensuite, les résultats du projet de téléopération sont présentés ainsi que les différentes statistiques des six derniers mois. Finalement, les prochaines étapes sont évoquées.

Ce rapport concerne la période du 1^{er} avril 2021 au 30 septembre 2021 soit le troisième semestre de la phase 2 du projet pilote.

3. Contexte

Le contexte de la deuxième phase d'expérimentation de la ligne 100 est expliqué plus précisément dans le premier rapport de la phase 2. Pour rappel et à des fins de compréhension du présent rapport, le parcours reste identique et deux navettes Navya sont en circulation. Les horaires officiels et publiés sur Internet restent valables. Une cadence à 30 minutes est mise en place de 6h30 à 18h30 avec un renforcement à 15 minutes durant les heures de pointe du matin et du soir.

La construction de l'éco-quartier du Marly Innovation Center (MIC) avance à grand pas avec la livraison des premiers appartements prévue en décembre 2021. La première étape comprend la construction de 353 logements, d'une piscine couverte publique ainsi que de surfaces d'activités et d'un centre commercial de proximité. A terme, le nouveau quartier occupera 13.5 hectares composés de logements pour 2'500 habitants. Au changement d'horaire de décembre prochain, le projet pilote de la ligne 100 prendra fin pour laisser place à une prolongation de la ligne 8 depuis la gare de Fribourg pour desservir le MIC. Cette modification de la desserte correspond à la planification convenue au début du projet. La ligne 100 est une solution intermédiaire avant la mise en service d'une ligne conventionnelle.



Figure 1 - Marly Innovation Center – Chantier Ecoquartier 2021

Le plan de protection pour lutter contre la COVID-19 est toujours en vigueur afin de continuer la protection des clients et du personnel. Le port du masque est obligatoire dans les navettes et les locaux des TPF. Les navettes font l'objet d'un nettoyage régulier et soigneux.

4. Développements effectués

4.1. Projet Téléopération

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

Le projet comprend 6 workpackages et est désormais terminé. Les résultats définitifs sont brièvement résumés dans les chapitres suivants. Pour l'obtention d'informations complémentaires, l'équipe de Swissmoves (<https://swissmoves.ch/>) et les TPF se tiennent à disposition.

4.1.1. Activités par Workpackages

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

Analyse de la rentabilité économique

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

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

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

Concernant la mise en œuvre de la téléopération, différents moyens ont été utilisés pour produire un outil au format Excel visant à mettre en évidence la viabilité économique de la téléopération. L'outil a été conçu pour être pratique et ciblé pour les partenaires du projet, afin qu'ils puissent l'utiliser pour vérifier si l'intégration de la téléopération sur leur navette automatisée serait économiquement avantageuse. Cependant, certaines données varient selon chaque partenaire, par exemple le prix d'acquisition de la navette, le nombre d'heures effectuées par les grooms, le Business Case de Téléopération et le nombre de navettes. Ainsi, l'outil propose des champs

libres à renseigner en fonction des données spécifiques de chaque partenaire. Les données de base utilisées pour les calculs sont issues du coût moyen des opérations de navettes auprès de CFF, PostAuto et TPF.

Une fois les données saisies, l'outil calcule automatiquement les coûts des navettes opérées par un groom et les coûts des navettes assistées par téléopération (remplaçant un groom) sur un horizon de cinq ans. Ensuite, ces deux résultats sont comparés afin d'obtenir la solution la plus avantageuse pour les opérateurs. Ceci est illustré par des graphiques générés automatiquement en fonction des calculs dont un exemple est illustré ci-dessous.

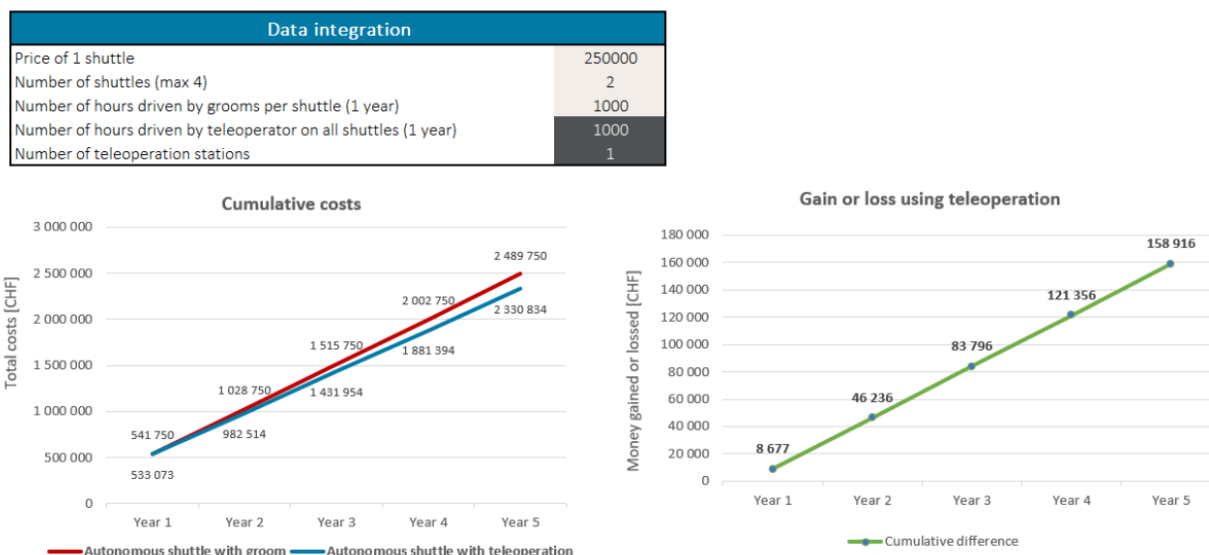


Figure 2 - Exemple de résultats du calcul de viabilité économique de la téléopération

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

Analyse de l'acceptance sociale – plan méthodologique

Phase 1 (recherche et consultation préliminaire)

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

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

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

En amont du projet, l'entreprise doit démontrer son ouverture à concevoir et modifier le projet afin de répondre aux besoins des parties prenantes. L'entreprise doit pouvoir expliquer ses objectifs et fournir un maximum d'informations pertinentes pour son projet (statistiques sur le secteur, sur

d'autres projets similaires, références concernant les technologies utilisées, avantages, limites et enjeux du marché). Un plan de communication est donc inévitable.

Phase 2 (information, évaluation et consultation)

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

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

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

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

Appropriation collective

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

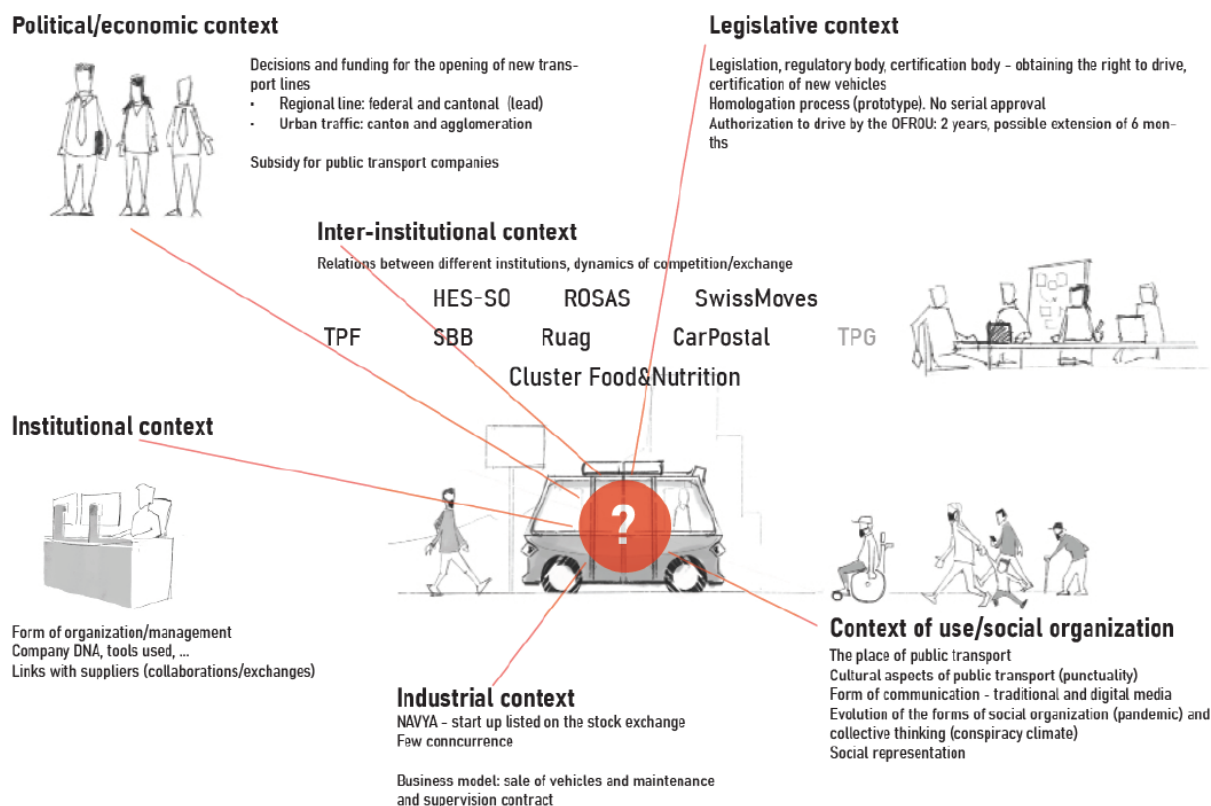


Figure 3 - Appropriation collective (six contextes identifiés)

Appropriation individuelle

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

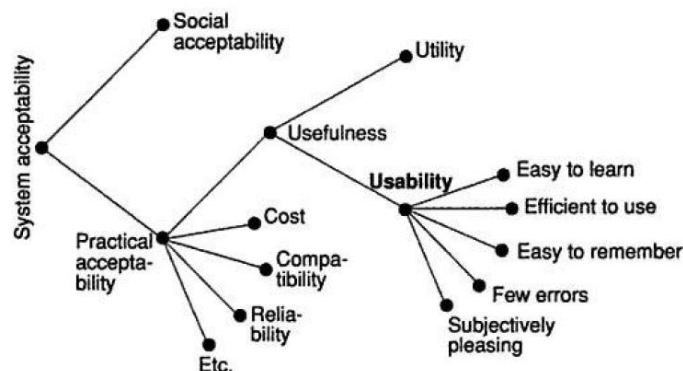


Figure 4 - Acceptabilité selon Nielsen (1993)

WP2 - Développement du système de téléopération au niveau conceptuel

Dans ce workpackage, la sécurité fonctionnelle a été analysée et des analyses sur les risques, la sûreté et la cybersécurité ont également été réalisées en suivant les normes ISO 26262 et 21434. L'architecture préliminaire de la téléopération a permis de définir tous les risques à considérer ainsi que les niveaux de sécurité requis afin de rendre le plus sûr possible le système de téléopération.

De plus, une preuve de concept (Proof-of-Concept / POC) a été réalisée grâce à un démonstrateur pouvant être conduit à distance par un téléopérateur. Le prototype de ce système d'exploitation à distance servira également de base à de futurs développements et tests. Ce concept est principalement composé de 3 éléments :

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

3) Communication infrastructure

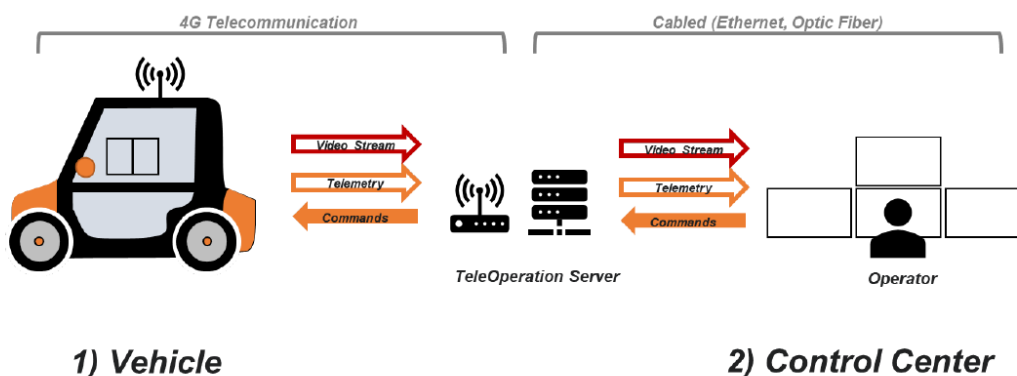


Figure 5 - Eléments du POC

Pour permettre le fonctionnement du système, au moins un téléopérateur (humain avec permis de conduire) est nécessaire. De plus, pour garantir un fonctionnement totalement sûr et pour éviter tout risque supplémentaire lors des tests, un groom est nécessaire. Le rôle du groom est

de reprendre physiquement la téléopération dans l'éventualité où une conduite sécuritaire du véhicule n'est plus assurée (par exemple en cas de panne critique du système de téléopération). Lors des tests effectués jusqu'à présent, le groom n'a jamais eu à reprendre l'opération.

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

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



Figure 6 - Démonstrateur PerceptIn et Navette Navya

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

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

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

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



Figure 7 - Centre de contrôle de la téléopération

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

Sécurité selon ISO 26262

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

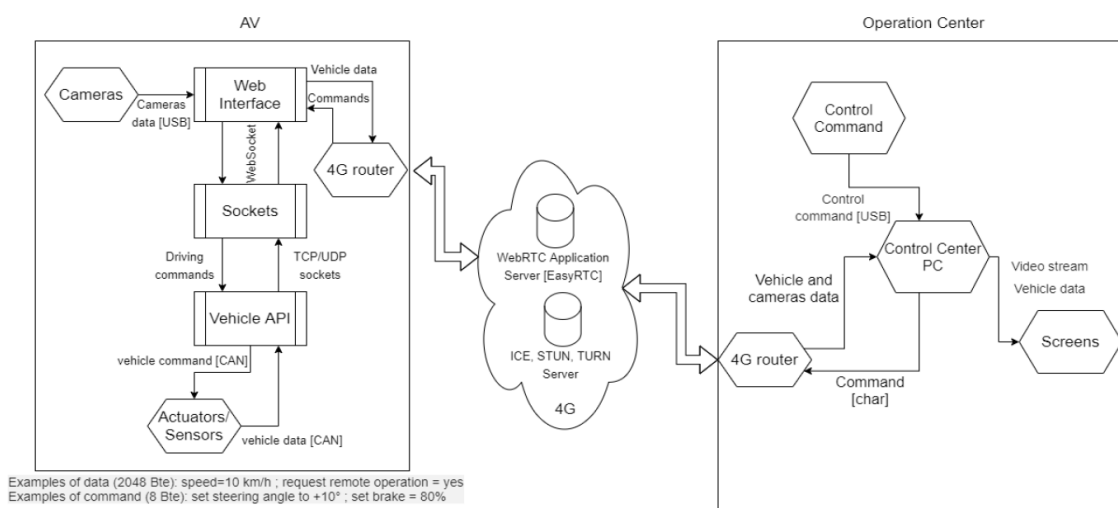


Figure 8 - Architecture préliminaire de la téléopération

Pour chaque fonction du véhicule autonome, une analyse de risque a été effectuée puis les risques identifiés et classés selon les standards ASIL (Automotive Safety Integrity Level). Cette classification permet de définir les exigences de sécurité nécessaires pour être en conformité avec la norme ISO 26262. L'ASIL est établi en effectuant une analyse des risques d'un danger potentiel en examinant la gravité, l'exposition et la contrôlabilité du scénario de fonctionnement

du véhicule. Des objectifs de sécurité (Safety Goals) sont ensuite définis. L'objectif du projet étant d'élaborer une preuve de concept de téléopération, les objectifs de sécurité ont été définis uniquement pour cet élément. Deux Safety Goals ont été définis pour la partie Téléopération :

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

Figure 9 - Safety Goals et Safe State

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

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

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

Model-Based Engineering (MBSE)

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

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

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

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

Localisation

Des algorithmes ont été développés pour générer en temps réel une carte autour du véhicule permettant de le localiser. L'utilisation de différents capteurs crée de minuscules erreurs qu'il y a lieu de corriger avec d'autres algorithmes et de la géolocalisation par un récepteur GNSS. Les expériences réalisées montrent que notre méthode améliore la précision de la solution d'origine et se comporte bien par rapport à d'autres méthodes utilisant la géolocalisation. Comme notre méthode repose sur une solution visuelle-inertielle déjà robuste, elle fonctionne même pendant

une courte période de perte de signal GNSS, la rendant suffisamment robuste pour être utilisée dans une application réelle comme un véhicule autonome.

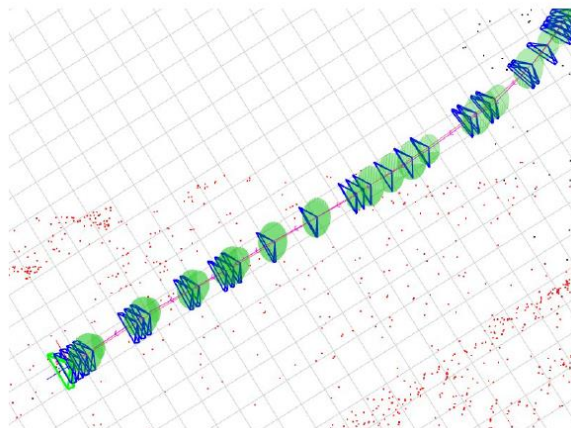


Figure 10 - Vue du dessus des mesures pour la localisation

Une vidéo montrant les résultats obtenus peut être consultée sur Internet : <https://youtu.be/bvuesYHef3o>

Perception

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

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



Figure 11 - Images couleurs et thermiques

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

- Unité de mesure inertielle (IMU)
 - Orientation et accélération du véhicule
- RADAR
 - Détection d'objets autour du véhicule, freinage d'urgence automatique
- GNSS/GPS

- Localisation globale du véhicule
- LIDAR
 - Carte 3D de l'environnement des véhicules environnants
- Capteur à ultrasons
 - Détection d'objets très proches autour du véhicule

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

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

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

Path planning

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

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



Figure 12 - Carte physique du MIC

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

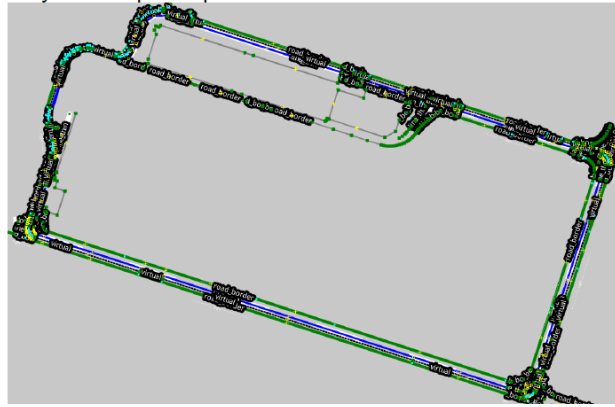


Figure 13 - Carte de segmentation du MIC

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

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

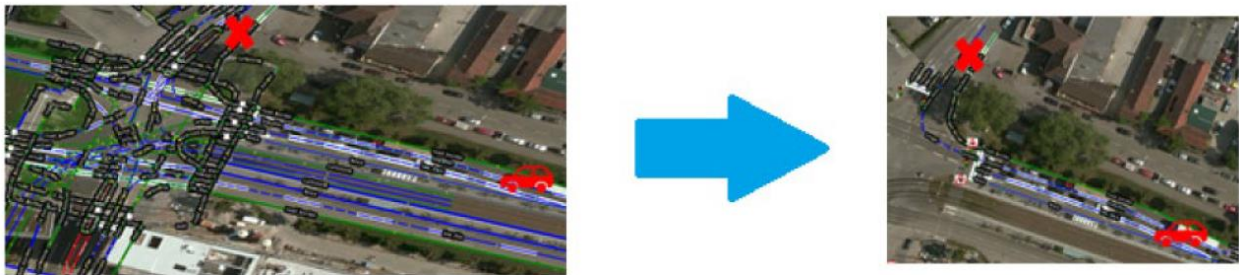


Figure 14 - Algorithmes de "Path Finding"

Cette vidéo montre la procédure utilisée pour la simulation du Path Planning : <https://youtu.be/tqu1TQik8Uk>

WP4 - Réglage et configuration du châssis et de la carrosserie

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

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

Figure 15 - Caractéristiques du PIXLOOP



Figure 16 - Plateforme PIXLOOP

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

- La catégorie de véhicule L6e-BU n'est pas réalisable avec la plateforme PixLoop, principalement à cause de la puissance. La puissance maximale pour la catégorie L6e-BU est de 6 kW, soit 1,5 kW par roue.
- Pour la catégorie de véhicule L7e-CU, il suffit de réduire la puissance de 1 kW à 15 kW, soit 0,25 kW par roue.
- Avec les réglementations européennes d'homologation actuellement en vigueur, un véhicule routier sans conducteur ne peut pas être homologué. La possibilité de dérogations aux réglementations existantes pour les nouvelles technologies ou concepts mentionnés à l'art. 40 du règlement (UE) 168/2013 exige l'application de l'autorisation de la Commission européenne. Cela nécessite, entre autres, des tests pour prouver que les exigences de sécurité et de protection de l'environnement sont respectées au moins dans la même mesure qu'avec les technologies conventionnelles. Tant que la Commission européenne ne donne pas son approbation, les approbations de type UE peuvent être délivrées au niveau national, mais elles ne sont valables que sur le territoire du pays concerné. Et cela nous amène à l'agrément suisse et aux règles de l'OETV. Ceux-ci sont généralement compatibles avec ceux de l'UE, et pour la catégorie L7e-CU en particulier les dimensions sont plus généreuses.
- L'objectif est de suivre ces règles pour le(s) véhicule(s) du projet en cours. L'OFROU peut également accorder des dérogations aux règles d'homologation en vigueur pour les nouvelles technologies.

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

WP5 - Vérification et validation

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

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

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

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

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

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

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

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

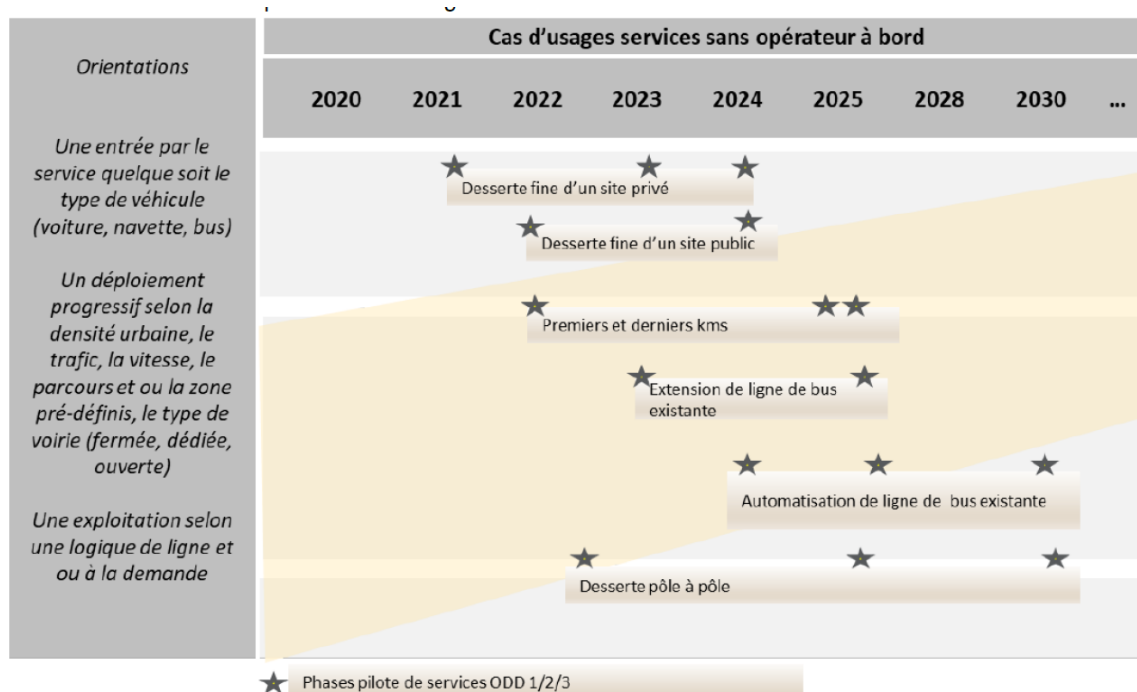


Figure 17 - Planning de déploiement de véhicules autonomes en France

Difficultés rencontrées

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

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

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

Points ouverts

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

Le Proof-of-Concept de la téléopération est fonctionnel, la prochaine étape sera de travailler sur la redondance de la transmission des données ainsi que sur la fiabilité. Pour y parvenir, des

discussions seront menées avec les fournisseurs d'accès Internet en Suisse. Plusieurs questions restent en suspens :

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

Les premières analyses du démonstrateur PixLoop ont été réalisées par l'institut SeSi et le Dynamic Test Center. Certains documents (système de direction, système de freinage) doivent être transmis par le constructeur PixMoving afin d'améliorer les analyses. Si elles sont concluantes, la prochaine étape serait de lancer le processus d'homologation auprès de l'OFROU pour la catégorie L6 ou L7.

La fonction permettant de passer du mode téléopération au mode autonome et inversement doit être développée. En effet, au vu des problèmes rencontrés avec le démonstrateur PerceptIn, il est préférable d'utiliser un autre démonstrateur pour le développement de cette fonction (navettes autonomes partenaires, démonstrateur PixLoop, véhicules RUAG, ...).

5. Résultats d'exploitation des navettes

Les résultats d'expériences obtenus entre les mois d'avril et septembre 2021 sont divisés en trois parties. Tout d'abord, les données statistiques sont présentées puis un point de situation de l'exploitation est effectué. Finalement, une appréciation générale du point de vue de l'exploitant est exposée.

5.1. Données

5.1.1. Kilomètres

Tableau 1 - Kilomètres par mois par véhicule

Mois	Navette rouge	Navette verte	Kangoo	Total
Avril	84 km	518 km	494 km	1'096 km
Mai	15 km	555 km	571 km	1'141 km
Juin	271 km	394 km	555 km	1'220 km
Juillet	332 km	355 km	611 km	1'298 km
Août	101 km	269 km	599 km	969 km
Septembre	535 km	446 km	266 km	1'247 km
Total	1'338 km	2'537 km	3'096 km	6'971 km

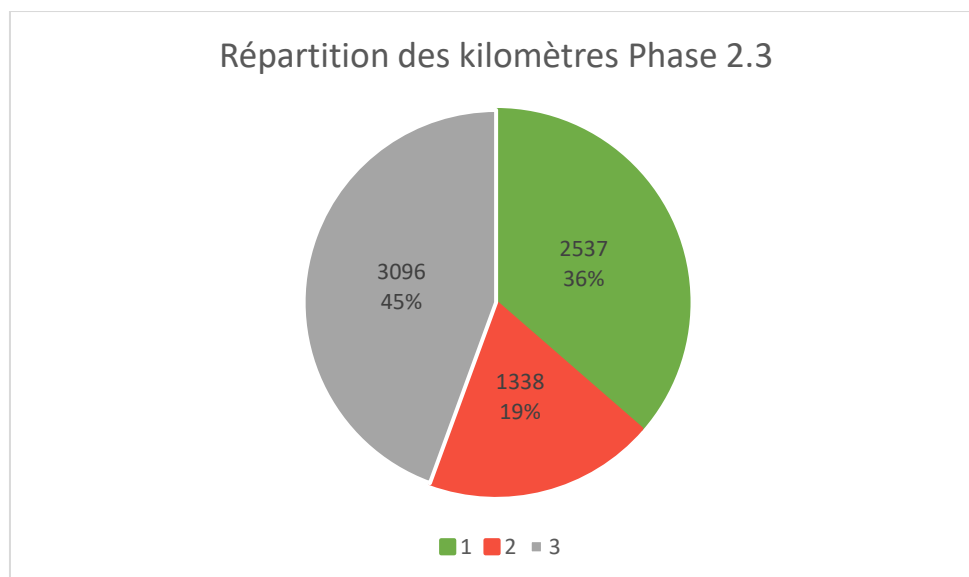


Figure 18 - Kilomètres totaux par véhicule

Constat

Les résultats de la navette rouge ne sont pas concluants sur les six derniers mois. En effet, de nombreux soucis techniques en avril, en mai puis en août ont entraîné des arrêts d'exploitation de plusieurs jours. Les kilomètres parcourus par la navette verte demeurent stables comparés aux phases de tests précédentes. Les travaux sur le site du MIC ont provoqué de nombreuses perturbations durant lesquelles l'utilisation du Kangoo était nécessaire. Les problèmes récurrents sur la navette rouge ont eu tendance à décourager les grooms qui préféraient parfois utiliser le Kangoo plutôt que de la mettre en service. Une autre observation est que lors de travaux impactant le parcours des navettes, les grooms circulaient avec le Kangoo sur la demi-journée au lieu de l'utiliser uniquement sur les quelques courses perturbées.

Comparaison avec phase 1 et rapports intermédiaires 2.1 et 2.2

Tableau 2 - Moyenne mensuelle des kilomètres par phase

Phase	Navette rouge	Navette verte	Kangoo
Phase 1 (sept 17 – mars 20)	607 km	493 km	521 km
Phase 2.1 (avril 20 –sept 20)	365 km	387 km	412 km
Phase 2.2 (oct 20 - mars 21)	363 km	391 km	344 km
Phase 2.3 (avril 21 – sept 21)	223 km	423 km	516 km

Les kilomètres mensuels effectués par la navette verte sont relativement stables entre les différentes phases contrairement aux moyennes mensuelles de la navette rouge et du Kangoo qui sont beaucoup plus fluctuantes. L'exploitation des navettes est sensible à de nombreux facteurs internes ou externes qui font leur apparition de manière totalement aléatoire et difficilement prévisible.

5.1.2. Passagers

Tableau 3 - Nombre de passagers par mois par véhicule

Mois	Navette rouge	Navette verte	Kangoo	Total
Avril	24	164	147	335
Mai	6	202	138	346
Juin	95	161	200	456
Juillet	130	140	164	434
Août	37	147	240	424
Septembre	266	248	127	641
Total	558	1'062	1'016	2'636

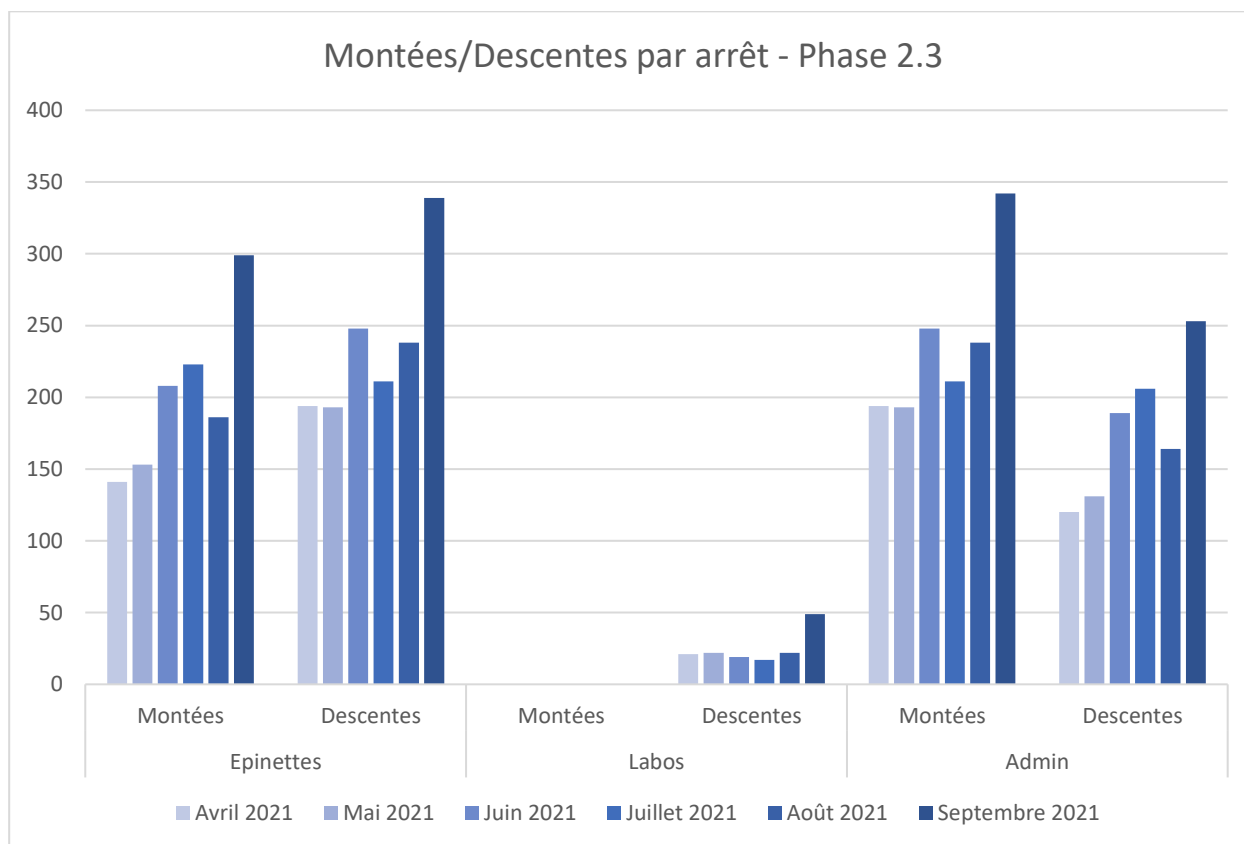


Figure 19 - Montées et descentes par arrêt

Constat

Le nombre de passagers transportés est en augmentation avec un mois de septembre particulièrement réjouissant. Contrairement aux années précédentes, la période estivale n'a pas été marquée par une diminution de la fréquentation mais cette dernière est restée stable. L'augmentation de la fréquentation de la ligne 100 est encourageante pour la future offre de transports publics qui sera mise en service en décembre 2021 pour desservir le MIC. Il est positif de constater que les pendulaires ont déjà pris l'habitude d'emprunter les transports publics pour se rendre sur leur lieu de travail.

Les arrêts les plus utilisés demeurent les deux terminus soit Epinettes et Admin. L'arrêt Labos est emprunté uniquement pour des descentes. En effet, comme les navettes stationnent durant leur temps de battement à l'arrêt Admin, les clients s'y rendent naturellement au lieu d'attendre à l'arrêt Labos situé à environ 150 mètres.

Tableau 4 - Nombre de passagers par kilomètre effectué

Mois	Navette rouge	Navette verte	Kangoo	Moyenne
Avril	0.29	0.32	0.27	0.29
Mai	0.40	0.36	0.22	0.33
Juin	0.35	0.41	0.35	0.37
Juillet	0.39	0.40	0.26	0.35
Août	0.37	0.55	0.39	0.44
Septembre	0.50	0.56	0.44	0.50
Moyenne	0.38	0.43	0.32	0.38

L'augmentation des passagers transportés se perçoit dans l'indice ci-dessus. La croissance est valable pour les trois véhicules avec une petite stagnation observée durant l'été puis une progression importante à la rentrée scolaire.

Comparaison avec phase 1 et rapport intermédiaire 2.1

Tableau 5 - Moyenne des passagers mensuelle par phase

Phase	Navette rouge	Navette verte	Kangoo
Phase 1 (sept 17 – mars 20)	156	144	89
Phase 2.1 (avril 20 –sept 20)	83	91	92
Phase 2.2 (oct 20 - mars 21)	88	87	80
Phase 2.3 (avril 21 – sept 21)	93	177	169

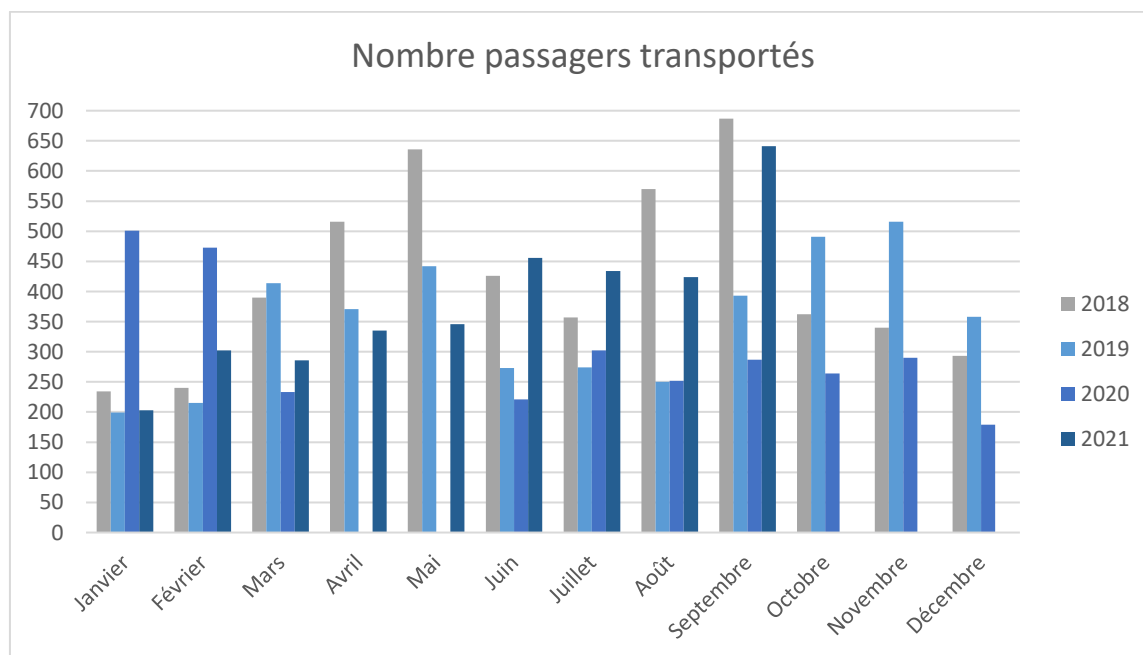


Figure 20 - Nombre passagers 2018-2019-2020-2021

Pour rappel, en 2018, beaucoup de passagers ont emprunté la ligne 100 par curiosité. Ensuite, l'année 2019 a connu une baisse des fréquentations car la clientèle est composée essentiellement des pendulaires du Marly Innovation Center. Durant les premiers mois de l'année 2020, une forte progression était observée mais elle a malheureusement été stoppée nette par le semi-confinement et l'arrêt d'exploitation des navettes entre mars et début juin.

L'année 2021 profite d'une très bonne progression avec une belle reprise en septembre et un nombre de passagers proche de la fréquentation de 2018. Il est positif de constater que malgré les problèmes techniques sur la navette rouge, la fréquentation augmente. Les TPF garantissent à leurs clients que les courses à l'horaire seront assurées quoiqu'il arrive. Une relation de confiance s'est ainsi créée entre les grooms et les pendulaires réguliers.

5.1.3. Conduite manuelle et automatique

Tableau 6 - Moyenne mensuelle conduite en manuel par véhicule

Mois	Navette rouge	Navette verte	Moyenne
Avril	-	30.3 %	30.3 %
Mai	52.7 %	29.7 %	41.2 %
Juin	94.5 %	57.9 %	76.2 %
Juillet	90.5 %	76.8 %	83.6 %
Août	75.7 %	63.2 %	69.5 %
Septembre	83.5 %	52.0 %	67.8 %
Moyenne	79.4 %	51.7 %	65.5 %

Constat

Le pourcentage de conduite en mode automatique s'est fortement dégradé ces derniers mois. La navette rouge a été conduite quasi exclusivement en manuel durant les mois de juin et juillet. Il peut être observé qu'en avril et mai, les données pour la navette verte sont plutôt bonnes. Dès que la navette rouge a eu des soucis, le pourcentage de conduite en manuel a également augmenté pour la navette verte. Ce phénomène peut s'expliquer par une perte de confiance des grooms qui ont préféré conduire la navette verte en manuel de peur de rencontrer les mêmes soucis qu'avec la rouge. A partir du mois d'août, la situation s'améliore car les grooms ont été sensibilisés et encouragés à utiliser la navette verte en automatique car elle ne présentait pas les mêmes difficultés que la navette rouge. Il sera intéressant d'observer les mois à venir pour voir si la situation évolue positivement.

Comparaison avec phase 1 et rapports intermédiaires 2.1 et 2.2

Tableau 7 - Moyenne mensuelle par phase

Phase	Navette rouge	Navette verte
Phase 1 (sept 17 – mars 20)	45.0 %	44.4 %
Phase 2.1 (avril 20 –sept 20)	29.1 %	30.1 %
Phase 2.2 (oct 20 - mars 21)	30.8 %	29.4 %
Phase 2.3 (avril 21 – sept 21)	79.4 %	51.7 %

Après des progrès encourageants sur les phases 2.1 et 2.2, la moyenne mensuelle a pris l'ascenseur durant la phase 2.3 selon les explications données précédemment.

5.1.4. Vitesse moyenne

Tableau 8 - Vitesse moyenne mensuelle par navette

Mois	Navette rouge	Navette verte	Moyenne
Avril	-	7.6 km/h	7.6 km/h
Mai	6.2 km/h	7.4 km/h	6.8 km/h
Juin	10.3 km/h	8.2 km/h	9.3 km/h
Juillet	10.5 km/h	9.5 km/h	10.0 km/h
Août	10.3 km/h	8.6 km/h	9.5 km/h
Septembre	10.3 km/h	9.1 km/h	9.7 km/h
Moyenne	9.5 km/h	8.4 km/h	9.0 km/h

Constat

Comme déjà démontré dans de précédents rapports, il existe une forte dépendance entre la conduite en mode manuel et la vitesse moyenne. En effet, les grooms ont tendance à conduire plus vite que la vitesse programmée en mode autonome. Les vitesses moyennes ont, par conséquent, fortement augmenté. Il y a également une tentation des grooms de continuer à rouler en mode manuel afin d'avoir des vitesses plus élevées mais cela ne profite évidemment pas à avoir des résultats réels de l'essai.

Comparaison avec phase 1 et rapports intermédiaires 2.1 et 2.2

Tableau 9 - Vitesse moyenne mensuelle par phase

Phase	Navette rouge	Navette verte
Phase 1 (sept 17 – mars 20)	8.4 km/h	8.2 km/h
Phase 2.1 (avril 20 –sept 20)	7.4 km/h	7.4 km/h
Phase 2.2 (oct 20 - mars 21)	7.4 km/h	7.3 km/h
Phase 2.3 (avril 21 – sept 21)	9.5 km/h	8.4 km/h

La vitesse moyenne mensuelle de la phase 2.3 pour la navette verte est proche de la première phase lorsque le tronçon dans la forêt de la Route de l'Ancienne Papeterie n'était pas encore programmé en mode autonome. Cependant, la moyenne de la navette rouge est plus élevée durant les six derniers mois que lors de la première phase.

5.2. Exploitation

Les problèmes techniques et d'environnement impactant l'exploitation sont expliqués dans les paragraphes suivants.

5.2.1. Facteurs externes

Des facteurs externes ont à nouveau perturbé l'exploitation des navettes durant les six derniers mois. Concernant le personnel, la période d'été a été passablement compliquée. En effet, à cause des vacances et d'une absence pour accident, un manque de personnel a été déploré les deux premières semaines d'août. Les prestations minimales de l'horaire ont pu être garanties mais une seule personne était présente sur site à certains moments de la journée impliquant parfois l'utilisation du Kangoo pour assurer convenablement la cadence 15 minutes.

Les conditions météorologiques ont été variées et parfois surprenantes notamment avec des chutes de neige à mi-avril qui ont évidemment provoqué des perturbations dans l'exploitation. L'arrivée du printemps a ensuite entraîné la croissance de la végétation sur les tronçons sensibles, c'est-à-dire le passage dans la forêt ainsi que la route d'accès au home des Epinettes. Les personnes chargées de l'entretien ont été réactives et ont permis de limiter la durée des dérangements. Par la suite, l'été a été pluvieux avec pour conséquence parfois l'arrêt de l'exploitation des navettes lorsque les averses étaient trop conséquentes mais avec comme avantage une faible utilisation de la climatisation des véhicules.



Figure 21 - Rencontre inattendue sur le parcours

Les travaux se sont poursuivis avec notamment le goudronnage final du secteur des Epinettes impliquant ainsi une fermeture totale de la circulation sur le haut du parcours des navettes durant deux jours. Une déviation a donc été mise en place avec le Kangoo via la route principale en direction de l'arrêt Jonction. Sur le site du Marly Innovation Center, le chantier bat son plein avec de très nombreux passages de camions. Le parcours à la sortie du site a été modifié à cause de nouveaux travaux. L'équipe de projet s'est coordonnée directement avec les grooms afin de garantir la faisabilité du nouveau passage. Pour les quelques mois restants et pour des raisons économiques, la cartographie de cette déviation ne sera pas effectuée.



Figure 22 et Figure 23 – Nouveau tracé sortie du MIC

En comparaison avec les phases précédentes, des facteurs externes similaires ont pu être observés. Certains facteurs peuvent être anticipés comme l'entretien de la végétation avec une réactivité plus importante des responsables de l'entretien par exemple. Les absences du personnel sont beaucoup plus difficiles à gérer car totalement inopinées. Dans l'ensemble, les récurrences des facteurs externes sont stables.

5.2.2. Problèmes techniques

Divers problèmes techniques ont eu des impacts sur l'exploitation et sont répertoriés dans le tableau suivant :

Tableau 10 - Problèmes techniques

Problème	Impacts	Mesures / Solutions
Lidar défaillant	Messages erreurs et arrêts	Changement du lidar
Climatisation	De l'eau coule vers la porte	Inspection par Navya
Sortie voie	Arrêt	Arrêt d'exploitation de P27, analyses et calibration lidars / 3D
Capot bloqué	Ouverture difficile du capot	Réparation du bouton
Amortisseur et compresseur / porte-fusibles	Suspensions en défaut	Changement du porte-fusible
Télécommande des feux défectueuse	Enclenchement du feu impossible	Réparation de la télécommande

Lidar défaillant

Sur la navette rouge, les données de l'un des lidars ne remontent pas correctement créant ainsi un message d'erreur sur le dashboard. Dans ce cas, la navette s'immobilise et ne peut pas rouler en mode autonome tant que l'erreur existe. Après plusieurs diagnostics et analyses, il s'est avéré que le lidar devait être changé. L'intervention de l'équipe de maintenance de Navya a dû être reportée car le lidar n'avait pas été livré à Navya. En effet, l'approvisionnement de certains composants subit d'importants retards à l'échelle internationale à cause de la pandémie.

Perte 3G

A fin mai, la navette rouge a eu des comportements inhabituels. En effet, lors de la descente des Epinettes en direction d'Admin, elle faisait de petits mouvements latéraux comme si elle hésitait mais sans sortir de son itinéraire malgré une trajectoire plus à droite que normalement. Puis lors de la course suivante au départ d'Admin en direction des Epinettes, la navette rouge est sortie de sa trajectoire dans le carrefour des Epinettes et est légèrement montée sur le trottoir. Le groom à bord a immédiatement réagi en reprenant la navette en mode manuel afin de la remettre sur la route avant de contacter Navya pour signaler l'incident. Aucun passager n'était présent dans la navette durant cette course. D'entente avec Navya, il a été convenu d'arrêter l'exploitation avec la navette rouge tant que l'origine du problème n'a pas été identifiée.

Amortisseur et compresseur

Le porte-fusible de la navette verte est défectueux avec pour conséquence d'avoir des dérangements sur le système de suspensions. Ces dernières ne fonctionnaient qu'aléatoirement et elles ne s'adaptaient plus correctement à la pente. Les grooms devaient donc bloquer manuellement les suspensions en position haute pour pouvoir franchir sans risque la rampe à la sortie du MIC. Durant l'intervention de Navya et comme la navette rouge était arrêtée à la suite de l'incident décrit précédemment, les portes-fusibles de la navette rouge et la navette verte ont été échangés. Cette pièce sera changée sur la navette rouge lors de l'intervention prévue en octobre par Navya.



Figure 24 - Fusible pour compresseur de suspension défectueux

Capot bloqué

Dans la calandre intérieure avant de la navette rouge se trouve deux gâchettes pour l'ouverture des capots avant et arrière. La gâchette pour l'ouverture du capot avant était inutilisable. Heureusement, il est possible d'ouvrir manuellement le capot en cas de besoin. Navya a pu réparer la gâchette lors de l'une de ses interventions.

Climatisation

Lors de l'utilisation de la climatisation sur la navette verte, de l'eau coule au-dessus de la porte. Après l'envoi de vidéos et photos du problème, Navya a indiqué que ce phénomène était connu sur les navettes du même type. Il est possible d'ajouter une pièce afin de rediriger l'eau afin qu'elle s'écoule le long de la porte sans gêner les passagers. Sans cette pièce, l'eau coule sur le milieu de la porte. Comme la fin de l'exploitation est prévue à la fin de l'année et que l'été a été clément, il a été décidé de ne pas acheter cette pièce supplémentaire.

Télécommande des feux défectueuse

Une télécommande pour les feux de signalisation au carrefour des Epinettes ne fonctionnait plus. Après ouverture du boîtier, il s'est avéré qu'un fil était débranché. L'électricien du site du MIC a pu faire la réparation nécessaire et la télécommande était à nouveau opérationnelle.



Figure 25 - Télécommande défectueuse

5.3. Appréciation générale de l'exploitant

Dans l'ensemble, l'exploitation des navettes a été relativement similaire aux périodes précédentes avec des influences de facteurs internes et externes. Le premier point positif a été l'amélioration de la communication avec Navya grâce à la création d'un nouveau canal de communication sur l'application Signal au lieu de Whatsapp et à une meilleure utilisation du système de ticket de Navya. Il est également réjouissant d'observer une belle progression du nombre d'utilisateurs de la ligne 100. Ce constat est de bon présage en vue de l'arrivée de la future ligne 8 jusqu'au Marly Innovation Center. Il est important de souligner que la ligne 100 a vraiment permis de fidéliser certains pendulaires à l'utilisation quotidienne des transports publics. Un aspect positif important est que le personnel des navettes n'a pas changé apportant ainsi une certaine stabilité à l'exploitation des navettes. En effet, le personnel connaît parfaitement le comportement et les réactions des navettes ce qui permet ainsi d'anticiper un certain nombre de problèmes.

L'évènement marquant des six derniers mois est la faillite de Bestmile. La direction de Bestmile a annoncé à ses clients sa mise en faillite en juin et la fin des obligations contractuelles en septembre. Les TPF ont accueilli la nouvelle avec tristesse et étonnement. Ils tiennent à souligner l'excellente collaboration durant ces dernières années. Actuellement, la plateforme en ligne est toujours active et permet encore de récolter les données sur les véhicules. Concernant la maintenance des navettes par Navya, les délais d'intervention ont augmenté avec plusieurs semaines d'attente. Des problèmes d'approvisionnement de certains composants à l'échelle mondiale ont été constatés notamment pour les lidars. Navya est intervenue trois fois lors des six derniers mois mais cela a tout de même provoqué de longues immobilisations de la navette rouge. Le chantier de l'écoquartier du Marly Innovation Center provoque de nombreuses perturbations. Le parcours à la sortie du site a dû être modifié et une nouvelle route a été créée pour le passage des navettes et des piétons. Cette déviation n'a pas été cartographiée puisque la fin de l'exploitation de la ligne 100 approche. Pour le personnel, il n'est pas toujours aisé de cohabiter dans les intersections avec le trafic poids lourds. Une baisse de motivation a été observée chez les grooms à cause des problèmes sur les navettes et de la routine qui s'est installée au fil des ans.

6. Développements futurs

Les prochaines étapes consistent principalement à préparer la fin de l'exploitation des navettes au Marly Innovation Center. Les locaux seront restitués à la fin de l'année et les navettes seront rapatriées chez les TPF en début d'année prochaine. Des réflexions et discussions sont actuellement menées pour définir la prochaine utilisation des deux navettes. Plusieurs pistes ont été retenues et doivent dorénavant faire l'objet d'approfondissements. Les principaux obstacles sont les limites techniques des véhicules et surtout les aspects financiers avec un coût d'exploitation encore très élevés. Les collectivités n'ont malheureusement pas les moyens financiers nécessaires à l'heure actuelle, la crise du COVID n'ayant évidemment pas amélioré la situation. Les plus petites collectivités montrent toutefois un intérêt important pour la desserte du dernier kilomètre et espèrent trouver des solutions à des prix abordables dans les prochaines années. En parallèle et pour le rapport final, les TPF travaillent sur une étude permettant d'identifier les points communs et les différences sur divers aspects entre les trains autonomes et les navettes automatisées ainsi que les synergies possibles entre les deux systèmes afin d'optimiser la chaîne de transport sur son ensemble.

La création de la Swiss Association for autonomous mobility (SAAM) au niveau national permet de développer de nouvelles idées et de partager les expériences entre les entreprises de transports publics mais également avec les milieux industriels et académiques. Cette association crée une nouvelle dynamique ouvrant de nouvelles perspectives après le projet pilote de Marly pour les TPF. Les TPF se réjouissent ainsi de continuer d'être un acteur actif sur le sujet de la mobilité autonome et innovante via cette association.

7. Conclusion

Cette nouvelle phase démontre bien qu'une certaine routine et des habitudes ont été acquises au fil du temps autant pour les grooms que pour les pendulaires et les différents partenaires du projet. Certes, il y a des problèmes techniques à résoudre plus ou moins contraignants mais l'important reste de garantir un service fiable et de qualité pour les clients. La ligne 100 est parvenue à s'intégrer dans le paysage fribourgeois et à être perçue quasiment comme une ligne « normale ». Toutefois, cette phase a mis en avant l'importance de l'humain dans ce système automatisé. En effet, les grooms sont un élément clé car au fil du temps ils connaissent parfaitement les comportements des navettes et peuvent même ainsi anticiper les problèmes techniques. Ils ont également une forte influence sur les résultats des essais. Comme stipulé précédemment, il y a aussi eu un certain lassissement à la suite des problèmes techniques de la navette rouge, ce qui les a conduits à utiliser plus que nécessaire le Kangoo. Il a donc fallu les sensibiliser à cette problématique et leur permettre de retrouver une vision positive. Les grooms ont aussi un rôle primordial dans le contact avec les clients et ce point ouvre beaucoup d'interrogations sur les futures interactions entre les clients et le véhicule lorsqu'un accompagnant ne sera plus obligatoire. Le projet de téléopération a aussi traité des questions sociétales et les résultats sont très intéressants. Les TPF espèrent que ce projet pourra continuer à être développé. L'association SAAM représente aux yeux des TPF une réelle opportunité pour continuer à explorer et chercher des solutions pour améliorer la mobilité de demain.

8. Tables des figures

Figure 1 - Marly Innovation Center – Chantier Ecoquartier 2021.....	3
Figure 2 - Exemple de résultats du calcul de viabilité économique de la téléopération	5
Figure 3 - Appropriation collective (six contextes identifiés).....	6
Figure 4 - Acceptabilité selon Nielsen (1993).....	7
Figure 5 - Eléments du POC.....	7
Figure 6 - Démonstrateur PerceptIn et Navette Navya.....	8
Figure 7 - Centre de contrôle de la téléopération	9
Figure 8 - Architecture préliminaire de la téléopération	9
Figure 9 - Safety Goals et Safe State	10
Figure 10 - Vue du dessus des mesures pour la localisation	11
Figure 11 - Images couleurs et thermiques.....	11
Figure 12 - Carte physique du MIC.....	12
Figure 13 - Carte de segmentation du MIC	13
Figure 14 - Algorithmes de "Path Finding"	13
Figure 15 - Caractéristiques du PIXLOOP	14
Figure 16 - Plateforme PIXLOOP.....	14
Figure 17 - Planning de déploiement de véhicules autonomes en France	16
Figure 18 - Kilomètres totaux par véhicule.....	18
Figure 19 - Montées et descentes par arrêt	19
Figure 20 - Nombre passagers 2018-2019-2020-2021	20
Figure 21 - Rencontre inattendue sur le parcours	23
Figure 22 et Figure 23 – Nouveau tracé sortie du MIC.....	23
Figure 24 - Fusible pour compresseur de suspension défectueux	25
Figure 25 - Télécommande défectueuse.....	25

Tableau 1 - Kilomètres par mois par véhicule	18
Tableau 2 - Moyenne mensuelle des kilomètres par phase	19
Tableau 3 - Nombre de passagers par mois par véhicule	19
Tableau 4 - Nombre de passagers par kilomètre effectué.....	20
Tableau 5 - Moyenne des passagers mensuelle par phase	20
Tableau 6 - Moyenne mensuelle conduite en manuel par véhicule	21
Tableau 7 - Moyenne mensuelle par phase	21
Tableau 8 - Vitesse moyenne mensuelle par navette.....	22
Tableau 9 - Vitesse moyenne mensuelle par phase	22
Tableau 10 - Problèmes techniques	24