



expérimentations
navettes autonomes

Evaluations Socio-économique et Environnementale des Expérimentations

Ce projet a été financé par le Gouvernement dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir désormais intégré à France 2030, et opéré par l'ADEME



Appel à projet EVRA Expérimentation du véhicule routier autonome
Convention de contractualisation n° 1982C0050

Projet labellisé par 

Information

Livrable L5.3.2&5.4.2.

Version 1.1 : Approuvée Copil ENA

Date : 15.03.2023

Niveau de diffusion : Public

Auteurs

Louafi Bouzouina – ENTPE

Michel Dauvergne - Université Gustave Eiffel

Natalia Kotelnikova-Weiler -

Olivier Klein – ENTPE

Rayan Djeridi – ENTPE

Daniel Blaustein – ENTPE

Manel Soury – ENTPE

Benoit Lecureux – ENTPE

Chloé Morhain – ENTPE

Relecteurs

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Astrid Bocher – Université Gustave Eiffel

Coordinateur

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Université Gustave Eiffel

Cité des mobilités - 25 av. François Mitterrand, Case 24

69675 Bron Cedex

France

Tel: +33 4 72 14 23 79

Email : philippe.vezin@univ-eiffel.fr

www.experimentations-navettes-autonomes.fr

Avertissement

Les informations contenues dans ce document sont fournies « en l'état » et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. Les membres du consortium ne seront pas responsables des dommages de toute nature, y compris, sans limitation, les dommages directs, spéciaux, indirects ou consécutifs qui peuvent résulter de l'utilisation de ces matériaux, sous réserve de toute responsabilité obligatoire en raison de la loi applicable. Bien que les efforts aient été coordonnés, les résultats ne reflètent pas nécessairement l'opinion de tous les membres du consortium ENA.

© 2020 Consortium ENA

RESUME EXECUTIF

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du projet national d'Expérimentation de Navettes Autonomes (ENA) qui participe au développement des véhicules autonomes routiers, et plus particulièrement à leur introduction au sein des réseaux de transports en commun.

L'objectif principal de ce livrable consiste à présenter une synthèse des résultats des évaluations socio-économique et environnementale des expérimentations de navettes autonomes à CASA dans la technopole de Sophia-Antipolis et à Cœur de Brenne en Indre et Loire. Ces deux formes d'évaluation étant conduites de manière articulée et concomitante sur les deux terrains d'expérimentations, nous avons choisi de les présenter de manière conjointe.

Le présent livrable est donc le résultat de la synthèse de deux livrables annoncés en début de projet : L5.3.2 et L5.4.2. Il se situe dans la conduite de la définition du cadre méthodologique dans le livrable L1.2.1., et de la synthèse de la collecte de données nécessaires à l'analyse socioéconomique et environnementale présentée dans le livrable L5.3.1 et L.5.4.1.

En plus de la production de résultats, l'objectif de ce livrable consiste aussi à apporter un premier éclairage sur la méthodologie d'évaluation de ce type d'expérimentations et d'identifier les facteurs les plus sensibles, permettant ainsi de contribuer aux perspectives d'amélioration des bilans environnementaux et socioéconomiques du déploiement de la navette.

Afin de présenter les résultats des deux méthodes d'évaluation, nous reviendrons dans un premier temps sur la construction des scénarios et la modélisation de la demande (2). Certains compléments méthodologiques seront présentés dans une partie suivante (3). Les parties 4) et 5) seront respectivement dédiées à l'évaluation environnementale et socioéconomique. Pour chaque partie, un bilan sera effectué pour le terrain d'étude de CASA puis de Cœur de Brenne. Les principaux enseignements seront discutés et mis en perspective dans la conclusion (6).

TABLES DES MATIERES

1. INTRODUCTION	1
2. CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS ET MODÉLISATION DE LA DEMANDE	3
2.1. CONSTRUCTION DES SCÉNARIOS	3
2.2. MODÉLISER LA DEMANDE SUR LES TERRAINS D'ÉTUDES	6
2.2.1. Spécification des modèles	6
2.2.2. Résultats de la modélisation.....	8
2.3. INTERACTIONS ENTRE LES MÉTHODOLOGIES D'ÉVALUATION ACA ET ACV	12
3. RAPPELS MÉTHODOLOGIQUES POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE	13
3.1. CADRAGE	13
3.2. MISE EN ŒUVRE DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE	13
3.3. HYPOTHÈSES DE SYSTÈMES TECHNIQUES DANS LA SITUATION DE PROJET ET SES SCÉNARIOS.....	15
3.3.1. Scénario d'expérimentation	15
3.3.2. Scénario probable.....	17
3.3.3. Scénario optimiste	17
3.3.4. Variante high-tech.....	18
3.4. CONSTRUCTION DE L'INVENTAIRE – MODÈLE ACV.....	18
3.3.5. Inventaire de cycle de vie de l'unité fonctionnelle	18
3.3.6. Inventaire de cycle de vie de la navette automatisée	22
3.5. ANALYSES COMPLÉMENTAIRES	22
3.5.1. Zoom	22
3.5.2. Impacts directs de la navette automatisée.....	23
4. EVALUATION ENVIRONNEMENTALE	25
4.1. TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION : CASA.....	25
4.1.1. Evaluation des impacts environnementaux : zone d'influence.....	25
4.1.2. Terrain d'expérimentation CASA : Zoom	27
4.1.3. Terrain d'expérimentation CASA : Mode autonome seul.....	28
4.2. TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION CŒUR DE BRENNE	29
4.2.1. Evaluation des impacts environnementaux : zone d'influence.....	29
4.2.2. Evaluation des impacts environnementaux : mode autonome seul	30
4.2.3. Analyse complémentaire : Sensibilité des résultats à certains paramètres	31
5. EVALUATION SOCIOÉCONOMIQUE.....	33
5.1. TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION : CASA.....	33
5.1.1. Situation de référence	33

5.1.2. Scénario d'expérimentation	34
5.1.3. Scénario probable	36
5.1.4. Scénario optimiste	38
5.2. TERRAIN D'EXPÉRIMENTATION : CŒUR DE BRENNE	41
5.2.1. Situation de référence	41
5.2.2. Scénario d'expérimentation	41
5.2.3. Scénario probable	43
5.2.4. Scénario optimiste	45
6. CONCLUSION ET DISCUSSIONS	49
7. BIBLIOGRAPHIE	53
ANNEXE A :	55

1. INTRODUCTION

Interroger les expérimentations des navettes autonomes sous l'angle de l'usage met au centre la question de l'évaluation du service et ses effets socioéconomiques et environnementaux. C'est le cas du projet « Expérimentations de navette autonome » (ENA) qui expérimente :

- 1) Un service du dernier kilomètre dans le but de compléter l'offre de transport en commun dans la technopole située dans la communauté d'agglomération de Sophia Antipolis (CASA), et
- 2) Un service sur une distance de 18 km visant à relier quatre communes rurales au sein de la communauté de commune de Cœur de Brenne (CdB) dans l'Indre.

Un premier travail, réalisé dans le cadre du projet ENA, a permis de poser le cadre méthodologique de l'évaluation socioéconomique et environnementale d'un service de navette automatisée, en articulant l'analyse coût-avantage (ACA) et l'analyse en cycle de vie (ACV) (Bouzouina et al. 2021). Il a permis également de réaliser une première évaluation socioéconomique *ex ante* sur le territoire de CASA, à partir d'une ACA et avec des projections du service sur différents horizons temporels. Un deuxième travail a été dédié à l'enrichissement de ce cadre méthodologique, à l'actualisation des hypothèses et des scénarios et à la présentation des méthodologies de recueil de données nécessaires à la mise en place des deux types d'évaluation (Bouzouina et al., 2023). En s'appuyant sur ces deux travaux, l'objectif de ce livrable est de présenter les résultats de l'évaluation socioéconomique et environnementale à l'issue des expérimentations sur les deux terrains de CASA et de CdB.

Intervenant pendant l'expérimentation, cette évaluation ne permet pas de mesurer l'ensemble des impacts et se confond davantage avec une évaluation *de suivi*. Elle permet néanmoins d'estimer certains effets liés au coût financier, à l'usage/report modal vers la navette, à l'impact environnemental et d'établir un bilan quantitatif sur la base de données recueillies et des prévisions suivant différents scénarios. Tout en contribuant à la production de la connaissance sur la méthodologie d'évaluation des expérimentations de navettes autonomes, ce livrable vise également à identifier les facteurs les plus sensibles et les marges de progrès dans la perspective d'amélioration des bilans socioéconomiques et environnementaux d'un service de navette autonome.

Ce livrable est constitué de cinq parties. Après l'introduction, la deuxième partie est consacrée à la construction des différents scénarios et à la modélisation de la demande à partir des données d'enquête. Au scénario de référence et celui correspondant à la situation d'expérimentation, s'ajoutent deux scénarios hypothétiques (probable – basé sur les comportements observés et optimiste- basé sur les intentions déclarées) permettant de tester les marges de manœuvre par rapport à l'usage de la navette et son évaluation. La troisième partie est introduite pour préciser les éléments méthodologiques propres à l'évaluation environnementale, avant que les résultats de l'ACV soient présentés sur les deux terrains dans la quatrième partie. La cinquième partie présente, quant à elle, les résultats de l'ACA sur les deux terrains et suivant les différents scénarios. Une partie des sorties de l'ACV est monétarisée et mobilisée dans le bilan socioéconomique. La dernière partie est consacrée à la discussion générale des résultats et à la conclusion.

Objectifs du Livrable

- Réaliser une évaluation environnementale et socioéconomique des expérimentations des navettes autonomes sur les deux territoires de CASA et Cœur de Brenne ;
- Contribuer à la production de la connaissance sur la méthodologie d'évaluation des expérimentations de navettes autonomes ;
- Identifier les facteurs les plus sensibles et les marges de progrès dans la perspective d'amélioration des bilans environnementaux et socioéconomiques d'un service de navette autonome.

2. CONSTRUCTION DES SCENARIOS ET MODELISATION DE LA DEMANDE

2.1. CONSTRUCTION DES SCENARIOS

Une première étape de construction des scénarios et de modélisation de la demande pour chacun des scénarios a été nécessaire en vue de l'évaluation environnementale et socioéconomique. Trois scénarios d'évaluation socio-économique et environnementale sont comparés au scénario de référence, sur la base de critères d'offre (système technique, service de transport) et de demande (probabilité de report modal et d'usage de la navette en fonction des comportements observés et des intentions déclarées).

Le **scénario de référence** est celui décrit dans le livrable L1.2.1 (Bouzouina et al., 2021). Il correspond à l'évolution tendancielle du contexte global depuis la situation actuelle jusqu'à la situation future à l'horizon d'étude, en l'absence de projet. Il s'appuie sur les données d'enquête de mobilité, et plus particulièrement sur les trajets réalisés par les répondants, dont les résultats sont pondérés afin de reconstituer la demande de mobilité à l'échelle de chacun des deux terrains d'expérimentation.

Le **scénario d'expérimentation** est celui de la prolongation pour la durée de l'évaluation des conditions d'expérimentation. Il se base ainsi sur les caractéristiques actuelles du système technique et du service. Dans ce scénario, la demande correspond à celle du scénario de référence, à laquelle est ajouté l'usage réel de la navette autonome (chiffres des montées descentes fournis par l'opérateur articulés aux données issues de l'enquête mobilité).

Le **scénario optimiste** s'appuie sur des caractéristiques *idéales* de l'offre et les intentions d'usage de la navette sur la base de déclaration. Les caractéristiques du système technique et du service sont poussées jusqu'à un niveau maximum d'usage. Ce niveau est déterminé d'après les contraintes techniques, réglementaires, et en s'appuyant sur les échanges avec l'opérateur de service. Le niveau du service est ajusté afin de correspondre au niveau de la demande. La demande est déterminée en faisant basculer de leur mode habituel vers la navette (ou un combiné transports en commun + navette) tous les enquêtés ayant répondu être susceptibles d'utiliser celle-ci, pour leurs trajets pour lesquels cela est possible. Ce scénario peut être également baptisé « *intention-based scenario* ».

Enfin, le **scénario probable** utilise les mêmes caractéristiques d'offre que le scénario optimiste (système technique et service de transport). Dans ce scénario cependant, un niveau de demande probable est calculé par la modélisation des comportements de choix modal des usagers. Les modèles présentés dans la partie suivante sont utilisés pour prédire les usagers susceptibles de basculer de leur usage habituel vers l'usage du service de navette, et le niveau de la demande globale correspondante. Ce scénario peut être baptisé à son tour de « *behaviour-based scenario* ».

Les deux tableaux ci-dessous (1 et 2) présentent de manière synthétique les caractéristiques de chaque scénario dans les deux terrains d'expérimentations : CASA et Cœur de Brenne.

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES ET HYPOTHESES DES SCENARIOS A CASA

CASA	Scénario de référence	Scénario expérimentation	Scénario probable	Scénario optimiste
Source de données	<p>La demande est obtenue à partir des données redressées, tout déplacement représente un 'aller' réalisé sur une semaine pour l'ensemble des modes sur l'ensemble du périmètre de l'avenue Roumanille.</p> <p>La demande est ainsi multipliée par 2 pour représenter les déplacements 'aller-retour', par un coefficient de fréquentation indiqué par l'utilisateur et par un coefficient de redressement (pondération).</p> <p>Tous les motifs sont pris en compte : motif travail, loisirs, restauration et course</p>	<p>La demande calculée correspond à celle du scénario de référence plus la partie liée à la navette. Cette dernière prend en compte l'usage réel de la navette mesuré à partir des données des montées et descentes fournis par l'opérateur.</p>	<p>La demande de la navette et le report modal des autres modes sont obtenus à partir de la modélisation du choix modal à partir des comportements observés et faisant varier les variables de vitesse et les autres paramètres listés ci-dessous (paramètres de service-offre).</p> <p>Comme dans le scénario de référence, on rajoute le coefficient de l'aller-retour, de fréquentation et de redressement et on considère comme étant inclus dans le périmètre toute personne qui fréquente l'avenue Roumanille et qui est concernée par la ligne BHNS.</p>	<p>Ce scénario se base sur le même modèle estimé et utilisé dans le scénario probable mais avec moins de restrictions. Il se fie à l'intention des personnes enquêtés à utiliser la navette.</p> <p>La demande de la navette est obtenue à partir de l'enquête via la question "prendriez-vous la navette si elle desservait votre établissement" qui constitue un modèle de choix "optimiste". La demande correspondant au report modal est obtenue à partir des déplacements réalisés par les personnes se déclarant prêtes à prendre la navette, et ce sur le même périmètre géographique et des déplacements (en lien avec l'avenue Roumanille).</p>
Vitesse de la navette		9 km/h	30 km/h	30 km/h
Temps d'attente		-	-50%	-50%
Temps d'accès		-	-50%	-50%
Coût de la navette		0€	0€	0€
Coût de la voiture		-	+50%	+50%
Durée de vie de la navette		7 ans	7 ans	7 ans

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES ET HYPOTHESES DES SCENARIOS A CŒUR DE BRENNE

Cœur de Brenne	Scenario de référence	Scénario expérimentation	Scénario probable	Scénario optimiste
Source de données	<p>La demande est obtenue à partie des données redressées, tout déplacement représente un 'aller' réalisé sur une semaine pour l'ensemble des modes sur l'ensemble du périmètre des communes visées par la navette.</p> <p>La demande est ainsi multipliée par 2 pour représenter les déplacements 'aller-retour', par un coefficient de fréquentation indiqué par l'utilisateur et par un coefficient de redressement (pondération)</p> <p>- Tous les motifs sont pris en compte : courses, travail, accompagnement et déplacement professionnel.</p>	<p>La demande calculée correspond à celle du scénario de référence plus la partie liée à la navette. Cette dernière prend en compte l'usage réel de la navette mesuré à partir des données des montées et des descentes fournies par l'opérateur.</p>	<p>La demande de la navette et le report modal des autres modes sont obtenus à partir de la modélisation du choix modal à partir des comportements observés et faisant varier les variables de vitesse et les autres paramètres listés ci-dessous. Comme dans le scénario de référence, on rajoute le coefficient de l'aller-retour, de fréquentation et de redressement et on considère comme étant inclus dans le périmètre toute personne résidant autour, d'au moins, 1km d'un arrêt de navette dans les communes déjà sélectionnées dans le scénario de référence.</p>	<p>La demande de la navette est obtenue à partir de l'enquête via la question "prendriez-vous la navette si elle desservait votre établissement" qui constitue un modèle de choix "optimiste". Le report modal est obtenu à partir des déplacements réalisés par les personnes se déclarant prêtes à prendre la navette, et ce sur le même périmètre géographique et celui utilisé dans le scénario de référence (déplacements dans les communes desservies par la navette).</p>
Vitesse de la navette		40 km/h	Jusqu'à 60 km/h	Jusqu'à 60 km/h
Temps d'accès		-	-50%	-50%
Cout de la navette		0€	0€	0€
Durée de vie de la navette		7 ans	7 ans	7 ans

2.2. MODELISER LA DEMANDE SUR LES TERRAINS D'ETUDES

La modélisation de la demande s'appuie sur la théorie de la rationalité des individus, qui cherchent à maximiser leur utilité (bien-être) avec des ressources limitées et dans un contexte contraint. Dans le cas du choix de mode de transport, cela se traduit notamment par l'usage du mode qui répond au mieux à leurs contraintes financières et en termes de temps. Ce choix varie aussi selon les individus. Les modèles qui permettent d'analyser les choix effectués par les individus et de les prédire dans des conditions nouvelles relèvent de la famille des modèles de choix discrets fondés sur la rationalité limitée (McFadden 1974).

On utilise généralement, pour cette dimension prédictive de la modélisation, les données de mobilité réelle telles que celles recueillies dans la première partie de l'enquête réalisée sur les deux terrains. Cependant, le nombre de déplacements et de personnes ayant eu recours à la navette dans le cas des deux expérimentations était très faible pour permettre une modélisation robuste de son usage. Le choix a donc porté sur l'utilisation des données de préférences déclarées, basées sur les choix hypothétiques effectués par les répondants dans le cadre de l'expérience de choix (deuxième partie de l'enquête, voir livrables L1.2.1 et L5.3.1 – Bouzouina et al., 2021 et 2023).

2.2.1. Spécification des modèles

La spécification des modèles consiste à déterminer les alternatives disponibles (c'est-à-dire les modes que peuvent choisir les répondants), la sélection des variables et leur définition dans le modèle, ainsi que le choix du type de modèle.

Ici, le choix des alternatives disponibles est dicté par celles proposées dans le cadre de l'expérience de choix (Bouzouina et al. 2023). Dans la modélisation, il a été décidé de conserver les alternatives de l'expérience de choix à CASA : voiture personnelle, bus+marche ou bus+navette. A Cœur de Brenne, les alternatives ont été limitées à la voiture personnelle (mode exclusif des répondants ayant complété la partie « *préférences déclarées* » de l'enquête), et au service de navette (les résultats relatifs à d'autres formes de services de véhicules autonomes ne sont pas utilisés dans ce cadre).

Supposons que l'on puisse définir un indice de satisfaction, ou utilité, qu'on notera U_j pour chaque alternative (mode choisi), qui dépend linéairement des variables coût (x) et temps (z) parmi d'autres. L'utilité V_j est composée d'une composante déterministe U_j qu'on peut observer et mesurer et d'une composante aléatoire ϵ_j qui est inobservable, $V_j = U_j + \epsilon_j$.

A CASA, on dispose de 3 choix de modes possibles, ce qui implique trois équations d'utilité associées à chaque mode. Ces équations sont définies telles que :

$$\begin{cases} U_1 = \alpha_1 + \beta x_1 + \gamma z_1 \\ U_2 = \alpha_2 + \beta x_2 + \gamma z_2 \\ U_3 = \alpha_3 + \beta x_3 + \gamma z_3 \end{cases}$$

Dans ce cas, le choix de l'alternative j croît avec U_j . Pour l'estimation, il faut transformer U_j qui peut prendre n'importe quelle valeur réelle pour qu'il appartienne à l'intervalle $[0,1]$ et peut être interprété comme une probabilité. Le modèle logit multinomial est obtenu en appliquant une transformation aux U_j s telle que :

$$\begin{cases} P_1 = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2} + e^{V_3}} \\ P_2 = \frac{e^{V_2}}{e^{V_1} + e^{V_2} + e^{V_3}} \\ P_3 = \frac{e^{V_3}}{e^{V_1} + e^{V_2} + e^{V_3}} \end{cases}$$

Les variables qui entrent dans la construction du modèle sont des variables issues du questionnaire. Des variables spatiales ont été ajoutées à partir des adresses données par les individus pour suivre leurs itinéraires et calculer leur distances, temps de marche et coûts entre leur domicile et lieu d'activité ou arrêt de bus.

Ces variables ont été testées, dans un processus de régression pas-à-pas (stepwise regression). Ce processus implique la construction itérative du modèle final par l'ajout ou la suppression successive des variables explicatives potentielles en testant sa significativité statistique à chaque étape. Après avoir testé les différentes combinaisons de variables et leur significativité sur la qualité du modèle. Le tableau ci-dessous synthétise les variables du modèle de choix discret.

TABLEAU 3 : VARIABLES RETENUES POUR LE MODELE DE CHOIX DISCRET MULTINOMIAL

Variables retenues dans le modèle à choix discret multinomial
Age
Revenu
Coût associé au mode
Temps de trajet associé au mode
Temps d'accès associé au mode
Temps d'attente associé au mode

Les variables âge et revenu sont des variables individuelles, qui varient d'un individu à un autre indépendamment du choix du mode. Les variables coût, temps de trajet, temps d'accès et temps d'attente sont des attributs du mode. Ce sont des variables qui varient d'un individu à un autre, mais aussi au sein du même individu selon le mode choisi.

A CASA, le modèle retenu est un modèle multinomial conditionnel avec 3 alternatives (choix) : mode voiture (Voit), mode bus+marche (BusMAP), et mode bus+navette (BusNAV). On prend comme classe de référence (ref) le mode voiture.

La fonction d'utilité de chaque alternative est spécifiée ainsi :

- $V_{\text{voiture}} = \text{ASC}_{\text{Voit}}(\text{ref}) + \beta_{\text{Coût}}(\text{ref}) * \text{Coût}_{\text{Voit}} + \beta_{\text{TempsTrajet}}(\text{ref}) * \text{TempsTrajet}_{\text{Voit}} + \beta_{\text{TempsAcces}}(\text{ref}) * \text{TempsAcces}_{\text{Voit}} + \beta_{\text{TempsAttente}}(\text{ref}) * \text{TempsAttente}_{\text{Voit}}$
- $V_{\text{bus+marche}} = \text{ASC}_{\text{BusMAP}} + \beta_{\text{Coût}} * \text{Coût}_{\text{BusMAP}} + \beta_{\text{TempsTrajet}} * \text{TempsTrajet}_{\text{BusMAP}} + \beta_{\text{TempsAcces}} * \text{TempsAcces}_{\text{BusMAP}} + \beta_{\text{TempsAttente}} * \text{TempsAttente}_{\text{BusMAP}} + \beta_{\text{Revenu}} * \text{Revenu} + \beta_{\text{Age}} * \text{Age}$
- $V_{\text{bus+navette}} = \text{ASC}_{\text{BusNAV}} + \beta_{\text{Coût}} * \text{Coût}_{\text{BusNAV}} + \beta_{\text{TempsTrajet}} * \text{TempsTrajet}_{\text{BusNAV}} + \beta_{\text{TempsAcces}} * \text{TempsAcces}_{\text{BusNAV}} + \beta_{\text{TempsAttente}} * \text{TempsAttente}_{\text{BusNAV}} + \beta_{\text{Revenu}} * \text{Revenu} + \beta_{\text{Age}} * \text{Age}$

A Coeur-de-Brenne, le modèle retenu est également un modèle multinomial logit conditionnel mais avec seulement deux choix (mode voiture, mode navette). Il s'agit d'un modèle logit binaire. On prend comme classe de référence (ref) le mode voiture.

La fonction d'utilité de chaque alternative est spécifiée ainsi :

- $V_{voiture} = ASC_{Voit(ref)} + \beta_{Coût_Voit} * Coût_Voit + \beta_{TempsTrajet(ref)} * TempsTrajet_Voit + \beta_{TempsAcces(ref)} * TempsAcces_Voit$
- $V_{navette} = ASC_{NAV} + \beta_{Coût_NAV} * Coût_NAV + \beta_{TempsTrajet} * TempsTrajet_NAV + \beta_{TempsAcces} * TempsAcces_NAV + \beta_{Revenu} * Revenu + \beta_{Age} * Age$

Un écart entre les prévisions basées sur des déclarations de choix (préférences déclarées) et des choix réels (préférences révélées) est possible. Cet écart découle du caractère hypothétique des situations de choix dans lesquelles sont placés les répondants.

Ceux-ci peuvent avoir tendance à surestimer ou sous-estimer leur choix hypothétique d'un mode par rapport à leur choix réel. Pour tenir compte de cet écart, un ajustement de la constante d'alternative a été utilisé sur le modèle de Cœur-de-Brenne. Cet ajustement consiste à faire varier la constante d'alternative (qui traduit les effets des variables non prises en compte dans le modèle), de manière à ajuster la prévision du modèle issue de données de préférences déclarées à la part de marché réelle du mode. Les autres paramètres du modèle sont considérés refléter les préférences des usagers potentiels.

2.2.2. Résultats de la modélisation

Les résultats de la modélisation du choix modal confirment l'effet des variables associées aux coût généralisé dans le cas de CASA (Tableau 4) et de Cœur de Brenne (Tableau 6). Les variables temps de trajet, temps d'accès, temps d'attente et coût sont toutes statistiquement significatives avec un effet négatif sur la probabilité d'utiliser la navette. En revanche, le facteur coût n'est pas significatif dans le cas de Cœur de Brenne. Pour les variables socioéconomiques, l'effet du revenu est négatif et significatif à CdB seulement. L'effet de l'âge est significatif quant à lui, mais avec un signe négatif dans le premier territoire et un signe positif sur le second. Cela est lié à la différence de composition démographique des deux populations et des motifs de déplacements conduisant à l'usage de la navette. A Cœur de Brenne, la navette est davantage utilisée par les retraités, pour rejoindre le marché en particulier, alors qu'elle est utilisée par les plus jeunes à CASA (Bouzouina et al., 2023).

Afin de mesurer l'effet de chaque variable sur la probabilité de choisir la navette, il est important de recourir au calcul des effets marginaux, équivalents aux élasticités dans les modèles de régressions linéaires, à partir des paramètres associés et qui ne sont pas interprétables en tant que tels. Cette étape est indispensable pour estimer des reports modaux permettant d'alimenter les différents scénarios cités précédemment. Il est également possible dans le cas de la modélisation binaire de calculer des odd ratios pour chaque variable. Les odd ratios représentent une autre manière d'interpréter les effets des variables issus du modèle sur le choix modal de l'individu. Un odd ratio d'une variable supérieur à 1 signifie que la variable a un effet positif sur le choix modal et augmente la probabilité de choisir ce mode. Un odd ratio inférieur à 1 indique l'inverse. Les effets marginaux et Odd ratios sont donnés dans les tableaux 5 et 7 pour CASA et CdB, respectivement.

Selon les résultats des effets marginaux, dans le cas de CASA (Tableau 5), quand le temps de trajet de la voiture augmente d'une unité (1mn) la probabilité de choisir ce mode diminue de 0,02 %, et la probabilité de choisir les autres modes (autre que voiture) augmente de 0,01 % pour le bus combiné à la navette (BusNav) et de 0,009 % pour le bus combiné à la marche à pieds (BusMAP).

Par ailleurs, quand le temps de trajet du bus combiné à la navette (BuNav) augmente d'une minute, la probabilité liée à son usage diminue de 0,02 %, et la probabilité de choisir les autres modes (autre que BuNav) augmente de 0,01 % pour la voiture et de 0,009 % pour le bus combiné à la marche à pieds (BusMaP). Ces résultats montrent que les marges de report modal, de la voiture vers le bus combiné à la navette, associées à l'amélioration du service, en augmentant la vitesse par exemple, sont relativement faibles sur le territoire de CASA.

Ces résultats de modélisation ont permis d'estimer les reports modaux de la voiture vers les transports en commun en prenant en compte la mise en service de la navette autonome en tant que mode exclusif, comme c'est le cas à CdB, ou en articulation avec un service de BHNS (cas de CASA). Le périmètre pris en compte est celui directement sous influence du nouveau service et ne prend pas en compte l'ensemble du territoire de l'enquête de CASA et de Cœur de Brenne. Des simplifications ont été introduites sur les parts modales issues des enquêtes. Le mode voiture englobe les deux modalités de conducteur et de passager. L'intermodalité a été ventilée sur les deux modes, en donnant la priorité au transport en commun quand il s'agit d'un mode combiné entre la voiture et le transport collectif.

TABLEAU 4 : RESULTATS DU MODELE LOGIT MULTINOMIAL A CASA

Variables	Coefficients
Constante (Bus+Navette)	5.69e(-01)** [1,99 e(-1)]
Constante (Bus+Marche)	8.09 e(-02) [1,99 e(-1)]
Temps de Trajet	-9,20 e(-02)*** [9,04 e(-03)]
Temps d'accès	-1,13 e(-01)*** [1,24 e (-02)]
Coût	-5,97 e(-01)***[3,53 e(-02)]
Temps d'attente	-9,06 e(-02)*** [2,52 e(-02)]
Revenu_Bus+Navette	-2,90 e(-05) [2,78 e(-05)]
Revenu_Bus+Marche	-3,99 e (-05) [2,78 e(-05)]
Age_Bus+Navette	-1,17 e (-02)* [5,22 e (-03)]
Age_Bus+Marche	-9,65 e(-04) [5,32 e(-03)]
Nb observations	2568
Log-Likelihood	-2336,4
McFadden R2	0,072

*** pvalue <0.00, **pvalue<0.01, * pvalue <0,05, pvalue<0.1, Erreur Standardisé (SE) entre []

TABLEAU 5 : EFFETS MARGINAUX DE LA VARIABLE TEMPS DE TRAJET (EN %/MIN)

Temps de trajet (min) / Probabilité d'être choisi (%)	Voiture	Bus+Navette	Bus+Marche
Voiture	-0,02	0,01	0,01
Bus+Navette	0,01	-0,02	0,01
Bus+Marche	0,01	0,01	-0,01

TABLEAU 6 : RESULTATS DU MODELE LOGIT BINAIRE A COEUR DE BRENNE

Variables	Coefficients
Constante (Navette)	2,04 * [0,04]
Temps de Trajet_Voiture	-0,22 * [0,09]
Temps de Trajet_Navette	-0,15 ** [0,05]
Temps d'accès	-0.10 *[0,04]
Coût	0,14[0,28]
Revenu_Navette	-0,00 ** [0,00]
Age_Navette	0,02 *[0,00]
Nbr observations	514
Log-Likelihood	-132,31
McFadden R2	0,096

*** pvalue <0.00, **pvalue<0.01, * pvalue <0,05, pvalue<0.1; Erreur Standardisé (SE) entre []

TABLEAU 7 : RATIO DES VARIABLES UTILISEES DANS LE MODELE LOGIT BINAIRE A COEUR DE BRENNE

Variables	Odds Ratio
Constante (Navette)	7,71 *
Temps de trajet_Voiture	0,80 *
Temps de Trajet_Navette	0,86 **
Temps d'accès	0,9 *
Coût	1,16
Revenu_Navette	1 **
Age_Nav	1,02 *

*** pvalue <0.00, **pvalue<0.01, * pvalue <0,05, pvalue<0.1

TABLEAU 8 : PARTS MODALES POUR LES 3 SCENARIOS A CASA

CASA	Scénario référence	Scénario expérimentation	Scénario probable	Scénario optimiste
Voiture	67 %	67 %	65 %	61 %
TC + Navette/ TC + Marche	33 %	33 %	35 %	39 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %

Pour le terrain d'expérimentation à CASA, situé autour de l'Avenue Roumanille, la répartition des parts modales est stable entre le scénario de référence et le scénario d'expérimentation (Tableau 8). Les usagers de la navette viennent exclusivement de la marche à pieds selon l'enquête quantitative et les entretiens avec les acteurs du territoire. De ce point de vue, l'impact de l'expérimentation est non significatif sur la voiture et peut être perçu négativement puisqu'il réduit le recours aux modes actifs.

En améliorant les conditions de service en faveur de la navette sur le scénario probable (Tableau 1), et en s'appuyant sur les résultats de modélisation, le report modal vers le transport en commun augmente de 2%. Cette augmentation est relativement faible étant données les conditions favorables telles que la vitesse de la navette qui passe au maximum autorisé sur la zone (30 km/h).

Même en relâchant les hypothèses sur les comportements et la capacité de service et en partant uniquement de l'intention d'usage dans le scénario optimiste, l'augmentation de l'usage des transports en commun via l'introduction du service de la navette autonome ne dépasserait pas les 6%.

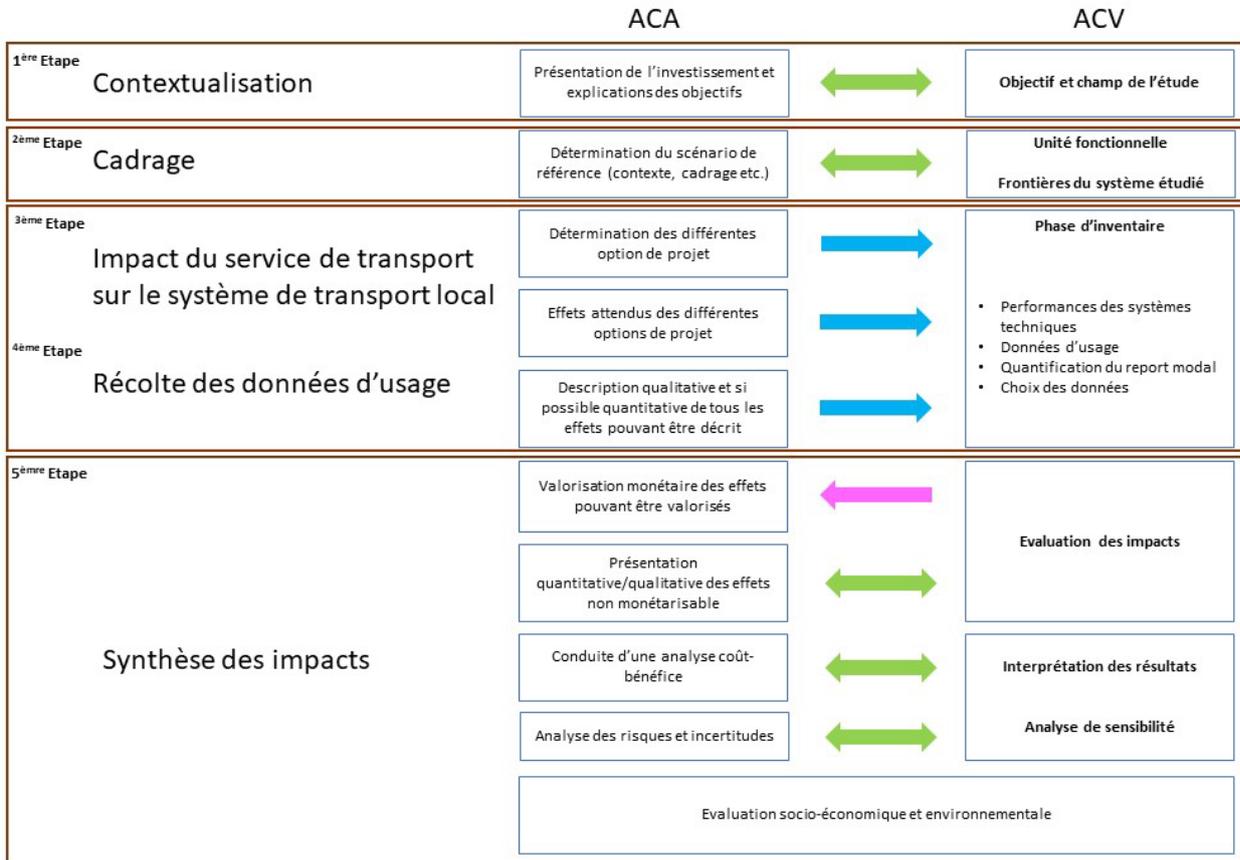
TABLEAU 8 : PARTS MODALES POUR LES 3 SCENARIOS A CŒUR DE BRENNÉ

Cœur de Brenne	Scénario référence	Scénario expérimentation	Scénario probable	Scénario optimiste
Voiture + Covoiturage	100 %	99 %	87 %	70 %
TC + Navette	0 %	1 %	13 %	30 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %

Les taux de report modal sur le territoire de Cœur de Brenne sont relativement différents par rapport au service du dernier kilomètre mis en place sur CASA, bien que les comparaisons comportent des limites. Néanmoins, l'impact de l'expérimentation de la navette autonome sur le report modal est relativement faible sur le territoire concerné dont la voiture est le mode exclusif. Environ 1% de la population a expérimenté le service durant la période d'observation.

Le report modal augmenterait de 13 % dans le scénario probable, en s'appuyant sur la reproduction des comportements dans une situation d'amélioration du service comme mentionné dans le tableau 1 (vitesse à 60 km/h et réduction du temps d'accès de 50 %). Cette augmentation d'usage de la navette est significative et témoigne d'une acceptation plus importante sur ce territoire relativement enclavé. Si l'on croit les intentions des habitants, issues de leurs déclarations dans l'enquête et en prenant en compte la capacité de service, 30 % seraient prêts à utiliser la navette en cas d'amélioration du service.

2.3. INTERACTIONS ENTRE LES METHODOLOGIES D’EVALUATION ACA ET ACV



3. RAPPELS METHODOLOGIQUES POUR L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

3.1. CADRAGE

Pour la description détaillée du cadre méthodologique et de la méthode, le lecteur est invité à se référer aux précédents livrables (Bouzouina et al., 2021; Bouzouina et al., 2023). Ici, afin de faciliter la lecture du document, nous en rappelons les principaux éléments.

L'objectif de l'étude est la comparaison entre la situation de projet, ses scénarios et la situation de référence afin de quantifier les impacts environnementaux du service automatisé et de ses conséquences, ce pour les deux terrains d'étude : CASA et Cœur de Brenne. L'évaluation porte sur la "zone d'influence" du service automatisé dans laquelle la répartition modale est modifiée par l'introduction du service de navettes. L'unité fonctionnelle s'exprime pour les deux terrains d'étude en adéquation avec l'objectif visé du service automatisé.

Pour Cœur de Brenne l'UF est "d'assurer le transport de passagers entre les communes de Martizay, Azay-le-Ferron, Paulnay et Mézières-en-Brenne, pendant 2 ans". Tandis que pour CASA l'UF est "d'assurer le transport des employés et des étudiants de l'avenue Roumanille (entre les 5 arrêts définis) aux heures de pointe (du lundi au vendredi, de 7h30-9h30; 11h45-14h15; 16h30-19h), pendant 2 ans".

Dans la situation de référence, ces déplacements sont réalisés avec les transports en commun (TC), les voitures particulières (VP) et la marche à pied. Tandis que dans la situation de projet, la navette automatisée reprend une partie de ces déplacements motorisés et non motorisés, ce qui peut induire du report modal entre la VP et les TC (lorsqu'elle facilite le rabattement de dernier km) et est susceptible d'en générer des nouveaux. L'ensemble des impacts est ramené au flux de référence, le passager.km.

3.2. MISE EN ŒUVRE DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

La mise en œuvre de l'évaluation environnementale par ACV est réalisée dans le logiciel OpenLCA 1.11.0 et mobilise la base de données EcoInvent 3.7.1. Pour l'évaluation des impacts, la méthode de caractérisation utilisée est EF v3.0 EN15804. Les impacts environnementaux pris en compte sont présentés dans le tableau suivant.

TABLEAU 9 : IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX PRIS EN COMPTE POUR L'ACV

Impact category	Reference unit
acidification - accumulated exceedance (ae)	mol H ⁺ -Eq
climate change - global warming potential (GWP100)	kg CO ₂ -Eq
ecotoxicity: freshwater - comparative toxic unit for ecosystems (CTUe)	CTUe
energy resources: non - renewable - abiotic depletion potential (ADP): fossil fuels	MJ, net calorific value
eutrophication: freshwater - fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg PO ₄ -Eq
eutrophication: marine - fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N-Eq
eutrophication: terrestrial - accumulated exceedance (AE)	mol N-Eq
human toxicity: carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh
human toxicity: non - carcinogenic - comparative toxic unit for human (CTUh)	CTUh
ionising radiation: human health - human exposure efficiency relative to u235	kBq U235-Eq
land use - soil quality index	dimensionless
material resources: metals/minerals - abiotic depletion potential (ADP): elements (ultimate reserves)	kg Sb-Eq
ozone depletion - ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-Eq
particulate matter formation - impact on human health	Disease incidence
photochemical ozone formation: human health - tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-Eq
water use - user deprivation potential (deprivation-weighted water consumption)	m ³ world eq. deprived

3.3. HYPOTHESES DE SYSTEMES TECHNIQUES DANS LA SITUATION DE PROJET ET SES SCENARIOS

Si la situation de projet et ses scénarios diffèrent par l'usage des différents modes (voir partie 2 : Construction de scénarios et modélisation de la demande), des hypothèses différentes ont également été prises pour les systèmes techniques de la navette automatisée.

Dans le scénario d'expérimentation, les caractéristiques du système technique sont issues des données d'expérimentation et des informations recueillies auprès des partenaires. Celles-ci sont complétées de données issues de la littérature afin de représenter le plus fidèlement possible le système expérimenté (se référer aux livrables précédents 5.3.1 pour la procédure et les résultats de recueil des données).

Le scénario probable représente l'évolution probable à court terme du système technique. Ce système technique est également repris dans le scénario optimiste mais une variante « high-tech » est également étudiée. Pour construire les hypothèses concernant l'évolution probable et la variante « high-tech », nous nous sommes appuyés sur les scénarios construits par les partenaires industriels du consortium SAM (également projet EVRA) lors d'ateliers collectifs animés par l'équipe d'évaluation et documentés dans le rapport technique (Kotelnikova et Feraille Fresnet, 2022).

Ce rapport présente en particulier deux scénarios – appelés « minimaliste » et « ambitieux » pour les navettes automatisées (pp. 44 à 49). Nous avons repris les principales hypothèses du scénario « minimaliste » pour construire nos scénario probable et optimiste et les hypothèses du scénario « ambitieux » pour construire notre variante « high-tech » du scénario optimiste.

Les hypothèses de fonctionnement des systèmes techniques retenues sont décrites dans les paragraphes qui suivent. En résumé, les scénarios diffèrent par le niveau d'équipement des trois principaux systèmes mobilisés pour l'automatisation du service de navette, à savoir le véhicule lui-même, la supervision et l'infrastructure.

TABLEAU 10 : NIVEAUX D'EQUIPEMENTS EN FONCTION DES SCENARIOS

	Véhicule	Supervision	Infrastructure	Usage de la navette
Scénario d'expérimentation	+	-	-/+	-
Scénario probable	+	+	+	+
Scénario optimiste				++
Variante high-tech	+	+	++	++

3.3.1. Scénario d'expérimentation

Dans le scénario d'expérimentation, à CASA le véhicule est une navette automatisée de niveau 3 du constructeur Navya et d'une capacité de 15 places. A Cœur de Brenne, le véhicule est un van Renault-Master automatisé au niveau 3 par l'entreprise Milla Group, d'une capacité de 7 places. Afin de faciliter la lecture des résultats et en l'absence d'informations concernant le van Milla Group, nous avons repris les caractéristiques de la navette Navya pour le scénario d'expérimentation à Cœur de Brenne.

Le véhicule de 2400kg, dont 350kg de batterie, est équipé de capteurs (3 caméras et 10 LiDARs), de 2 calculateurs, d'une unité de communication (courte portée et cellulaire), d'éléments de communication avec les passagers (écrans, interphonie – ces équipements ne sont pas modélisés dans l'évaluation environnementale). Ces équipements ont une durée de vie de 4 ans, en tenant compte de l'obsolescence rapide de ces technologies en développement.

La navette circule avec un opérateur à bord sur un itinéraire fixe. La longueur du parcours est de 1.1km sur l'avenue Roumanille à CASA (2.2km aller-retour) et de 18 km (36 km aller-retour) entre les 4 communes de Cœur de Brenne. La navette circule en trafic mixte, à 9km/h à CASA et à 40 km/h à Cœur de Brenne, en mode autonome sur 90% des km parcourus. La durée de vie du véhicule est de 7 ans, pour un usage annuel de 4900 km à CASA et 45 864km à Cœur de Brenne. La flotte du service expérimenté est composée de deux navettes à CASA (totalisant 18 720 v.km sur 2 ans) et d'une seule navette à Cœur de Brenne (totalisant 91 728 v.km sur 2 ans).

Le véhicule transfère en continu à Navya des données de télémétrie et de diagnostic, (5Mo/s par cellulaire, traité sur un serveur cloud du Tech AD provider).

Supervision à distance:

Compte tenu de la présence d'un opérateur à bord, nous avons fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de vidéo-surveillance à distance : pas de streaming vidéo, pas de communication à distance avec les passagers en cas d'incident. Seul un monitoring technique est assuré par un opérateur à distance surveillant les deux navettes. Pour cela on fait l'hypothèse qu'il accède aux mêmes informations que Navya, à savoir un flux de 5Mo/s transmis par cellulaire, également traité sur un serveur cloud mais cette-fois-ci de l'opérateur.

Equipements de l'infrastructure:

Sur l'expérimentation de Cœur de Brenne, malgré la présence d'un rond-point en sortie de la commune d'Azay-le-Feron, il n'y a pas d'équipements connectés de l'infrastructure à notre connaissance.

A CASA, deux feux connectés (contrôleur de carrefour + Unité de Bord de Route UBR « de sécurité » pour chacun) ont été installés sur l'itinéraire, permettant en particulier le franchissement en sécurité du rond-point à l'entrée de l'avenue Roumanille. Compte tenu de l'importance des travaux réalisés sur l'infrastructure, nous faisons l'hypothèse que les deux UBRs associées aux feux sont raccordées à la fibre.

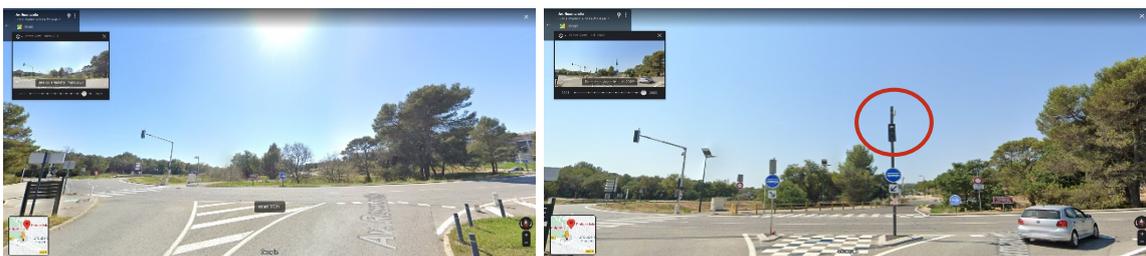


FIGURE 1 : IMAGES STREETVIEW DE L'AVENUE ROUMANILLE.

GAUCHE: MARS 2021. DROITE: JUILLET 2022 – AMENAGEMENT DE LA VOIERIE ET INSTALLATION D'UN FEU CONNECTE AVEC SON UBR.

Les contrôleurs de carrefours sont utilisés par l'ensemble du trafic, tandis que les UBR sont mutualisés par l'ensemble des véhicules connectés. Nous faisons l'hypothèse de 0.5% du trafic de véhicules connectés (ASFA2022) sur CASA et 0 à Cœur de Brenne.

Les amers LiDARs (blocs béton) installés sur les tronçons "ouverts" des itinéraires d'expérimentation n'ont pas été inclus dans l'évaluation environnementale.



FIGURE 2 : IMAGES STREETVIEW DE L'AVENUE ROUMANILLE.

GAUCHE: JUIN 2019. DROITE: JUILLET 2022 – IMPLANTATION D'AMERS A INTERVALLES REGULIERS SUR UN TRONÇON "OUVERT" DE L'ITINERAIRE.

3.3.2. Scénario probable

Le scénario d'évolution probable du système technique diffère du scénario expérimental en plusieurs points.

Côté véhicule, l'automatisation passe du niveau 3 au niveau 4. La durée de vie des équipements d'automatisation de la navette augmente de 4 à 8 ans pour tenir compte d'une maturité accrue. La navette circule sans opérateur à bord sur le même itinéraire et sa vitesse augmente. A CASA, elle passe de 9km/h à 30km/h et à Cœur de Brenne - de 40 à 60 km/h. De plus, la navette circule en mode autonome sur 100% des kilomètres parcourus. Les performances accrues s'accompagnent d'une intensification du service pour CASA où le kilométrage annuel passe de 4900km à 24 024km, permettant d'atteindre 96 096 v.km par les deux navettes sur deux ans.

Supervision à distance:

En l'absence d'opérateur à bord, nous faisons l'hypothèse que la vidéo-surveillance à distance est mise en place ainsi que l'échange de données entre le centre de supervision et la navette en cas d'incident et pour assurer une présence auprès des usagers.

Par ailleurs nous faisons l'hypothèse qu'avec la maturation du système technique, l'opérateur effectuant le monitoring technique et assurant cette présence à distance auprès des usagers est amené à superviser davantage de véhicules, 5 dans nos scénarios. Par conséquent, le streaming vidéo (50Mo/s par caméra, 6-7 caméras intérieures et extérieures de supervision) et l'échange de données (interphonie, informations voyageurs – 1Mo/s) s'effectue au plus durant 20% du temps de roulage de la navette – ce qui nous amène à faire l'hypothèse de 1.3 caméras de supervision en moyenne sur les kilomètres parcourus qui envoient leur flux vidéo à la supervision pour l'expérimentation de CASA et de Cœur de Brenne.

Equipements de l'infrastructure:

A CASA, le scénario d'expérimentation contient déjà des hypothèses concernant les feux connectés, elles sont maintenues.

A Cœur de Brenne, nous faisons l'hypothèse que le rond-point en sortie de la commune de Azay-le-Feron est équipé de feux connectés (contrôleur de carrefour + Unité de Bord de Route UBR « de sécurité ») afin de garantir un franchissement en toute sécurité de la navette sans opérateur à bord et sans recours à la validation des manœuvres à distance par la supervision. Nous faisons également l'hypothèse que l'UBR associée aux feux est raccordée à la fibre.

3.3.3. Scénario optimiste

Les hypothèses pour le système technique dans le scénario optimiste sont identiques aux hypothèses pour le scénario probable.

3.3.4. Variante high-tech

La variante “high-tech” proposée est une variante du scénario optimiste dans laquelle l’infrastructure est modifiée pour intégrer la perception débarquée, une nouvelle fonction de la supervision apparait et des informations de navigation sont reçues par la navette. Elle diffère donc du scénario probable/optimiste en plusieurs points.

Supervision à distance et équipe terrain:

La supervision peut intervenir pour valider des manœuvres à distance ce qui nécessite l’envoi depuis la navette du flux vidéo des caméras de supervision. Nous faisons l’hypothèse que les événements nécessitant ce type d’intervention sont les mêmes que ceux qui nécessitaient la vidéo-surveillance dans le scénario probable, et que ni leur durée ni leur fréquence ne sont affectées par la possibilité de validation de manœuvres à distance. La durée totale de streaming vidéo n’est donc pas modifiée dans cette variante.

Connectivité et perception débarquée:

Les capteurs débarqués, caméras et LiDARs visent à détecter le mouvement des véhicules d’urgence, la présence d’usagers vulnérables de la route et d’assurer la supervision sur le parcours de la navette et aux arrêts. La densité de ces capteurs sur l’infrastructure varie selon le contexte.

Pour le contexte urbain de CASA, la densité des caméras (1/km) et des LiDARs (1-2/km) est tirée du rapport Kotelnikova 2022 (scénario ambitieux navettes).

Pour Cœur de Brenne, territoire rural, nous faisons l’hypothèse que seuls les arrêts et leurs voies d’approche sont équipés avec 1 caméra et 2 LiDARs à chacun des 4 arrêts situés sur l’itinéraire de 18km. Les données brutes issues des capteurs sont traitées localement par des calculateurs débarqués (34W en moyenne fonctionnant 24h/24). Puis les informations produites, c’est-à-dire les Tracking lists, sont d’un part transféré aux véhicules par les UBRs et d’autre part à la supervision. La densité d’UBR est donc modifiée pour les deux sites. Pour CASA on fait l’hypothèse que les UBR sont implantés au niveau des arrêts, ce qui compte tenu de la densité des arrêts (5/1,1 km) et de la portée d’une UBR (de quelques centaines de mètres), garantit une couverture continue de tout l’itinéraire de la navette. Pour Cœur de Brenne, nous faisons la même hypothèse, à savoir que les UBR sont implantés au niveau des arrêts, ces unités viennent en complément de l’UBR installée au rond-point pour le feu connecté. Nous adoptons l’hypothèse que ces équipements (caméras, LiDARs, calculateurs débarqués) sont mutualisés pour l’ensemble du trafic de véhicules connectés – qui, pour rappel, constitue 0.5% à CASA et 0 à Cœur de Brenne.

En plus des tracking lists reçues par transfert en courte portée, le véhicule reçoit des informations complémentaires via la technologie I2V de longue portée (c’est-à-dire cellulaire) sur les incidents, travaux et fermetures de voies pour améliorer le confort et les reroutages éventuels (1Mo/s).

3.4. CONSTRUCTION DE L’INVENTAIRE – MODELE ACV

3.3.5. Inventaire de cycle de vie de l’unité fonctionnelle

Pour rappel, l’unité fonctionnelle est d’assurer un ensemble de déplacements sur la zone d’influence pendant 2 ans. Ces déplacements sont assurés par différents moyens dans les 5 cas étudiés (situation de référence, scénario d’expérimentation, scénario probable, scénario optimiste et sa variante high-tech): voiture particulière, désagrégée en 20 catégories suivant la taille, la motorisation et la norme euro (cf livrable précédent), le scooter, le car, le bus urbain et le BHNS et la navette dans la situation de projet et ses scénarios.

L'inventaire de cycle de vie de l'unité fonctionnelle est alors la somme des inventaires de cycle de vie des modes de transport utilisés pondérée par leur usage sur 2 années.

Afin de disposer des inventaires de cycle de vie de l'ensemble de ces modes, en dehors de la navette autonome, nous avons fait appel aux données génériques de la base Ecoinvent en réalisant deux modifications. Premièrement, les données génériques pour le véhicule électrique ont été modifiées afin de prendre en compte le mix électrique Français dans son usage. Deuxièmement, le BHNS du cas d'étude à CASA a été assimilé au bus urbain dans la modélisation. Les données génériques sont représentatives du contexte européen (indicatif RER dans les providers ci-dessous), sauf pour les véhicules GPL pris pour le contexte global et car, bus et scooter pris pour le contexte Suisse en l'absence d'autres données.

Le processus implémenté sous OpenLCA se présente alors comme suit, où les Flux d'entrée représentent les modes utilisés, la quantité est pilotée par un paramètre représentant l'usage de ce mode exprimé dans l'unité v.km ou p.km et le provider précise les données génériques issues de la base ecoinvent (sauf Mode-Autonomie, cf plus bas).

TABLEAU 11 : CONTRIBUTIONS DE L'ENSEMBLE DES MODES DE TRANSPORTS MOTORISES DE L'UNITE FONCTIONNELLE

Flux d'entrée	Quantité	Unité	Provider
Mode-Autonomie	NA	v.km	Mode-Autonomie
transport, passenger car, electric, ENA	electric	v.km	transport, passenger car, electric, ENA, U - GLO
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3	large_diesel_euro3	v.km	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 3 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4	large_diesel_euro4	v.km	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 4 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5	large_diesel_euro5	v.km	transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, large size, diesel, EURO 5 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3	large_petrol_euro3	v.km	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 3 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4	large_petrol_euro4	v.km	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 4 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5	large_petrol_euro5	v.km	transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, large size, petrol, EURO 5 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3	medium_diesel_euro3	v.km	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 3 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4	medium_diesel_euro4	v.km	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 4 Cutoff, S - RER

Flux d'entrée	Quantité	Unité	Provider
transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5	medium_diesel_euro5	v.km	transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, medium size, diesel, EURO 5 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, medium size, liquefied petroleum gas, EURO 5	medium_lpg_euro5	v.km	transport, passenger car, medium size, liquefied petroleum gas (LPG), EURO 5 transport, passenger car, medium size, liquefied petroleum gas, EURO 5 Cutoff, S - GLO
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3	medium_petrol_euro3	v.km	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 3 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4	medium_petrol_euro4	v.km	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 4 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5	medium_petrol_euro5	v.km	transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, medium size, petrol, EURO 5 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, small size, diesel, EURO 3	small_diesel_euro3	v.km	transport, passenger car, small size, diesel, EURO 3 transport, passenger car, small size, diesel, EURO 3 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4	small_diesel_euro4	v.km	transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4 transport, passenger car, small size, diesel, EURO 4 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5	small_diesel_euro5	v.km	transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5 transport, passenger car, small size, diesel, EURO 5 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3	small_petrol_euro3	v.km	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 3 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4	small_petrol_euro4	v.km	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 4 Cutoff, S - RER
transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5	small_petrol_euro5	v.km	transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 transport, passenger car, small size, petrol, EURO 5 Cutoff, S - RER
transport, passenger coach	coachPkm	p.km	transport, passenger coach transport, passenger coach Cutoff, S - CH
transport, passenger, motor scooter	scooterPkm	p.km	transport, passenger, motor scooter, ENA Cutoff, U - CH
transport, regular bus	BusPkm	p.km	transport, regular bus transport, regular bus Cutoff, S - CH

Les scénarios sont alors pilotés par les paramètres suivants décrivant l'usage des différents modes de transport dans la situation de référence, le scénario expérimental, probable et optimiste (mêmes valeurs d'usage pour la variante high-tech).

TABLEAU 12 : PARAMETRES DECRIVANT LES DIFFERENTS MODES DE TRANSPORT

Paramètre	Unité	Description
NA	v.km	Nombre de véhicules.kilomètres réalisés par l'ensemble des navettes du service automatisé lors des 2 années de service.
electric	v.km	Nombre de véhicules.kilomètres réalisés par l'ensemble des véhicules particuliers électriques pour effectuer les déplacements inclus dans le périmètre d'étude durant les 2 années.
large_diesel_euro3	v.km	Similaire mais pour la catégorie "grand", motorisation diesel et norme euro 3.
large_diesel_euro4	v.km	Similaire mais pour la catégorie "grand", motorisation diesel et norme euro 4.
large_diesel_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "grand", motorisation diesel et norme euro 5.
large_petrol_euro3	v.km	Similaire mais pour la catégorie "grand", motorisation essence et norme euro 3.
large_petrol_euro4	v.km	Similaire mais pour la catégorie "grand", motorisation essence et norme euro 4.
large_petrol_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "grand", motorisation essence et norme euro 5.
medium_diesel_euro3	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation diesel et norme euro 3.
medium_diesel_euro4	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation diesel et norme euro 4.
medium_diesel_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation diesel et norme euro 5.
medium_lpg_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation gpl et norme euro 5.
medium_petrol_euro3	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation essence et norme euro 3.
medium_petrol_euro4	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation essence et norme euro 4.
medium_petrol_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "moyen", motorisation essence et norme euro 5.
small_diesel_euro3	v.km	Similaire mais pour la catégorie "petit", motorisation diesel et norme euro 3.
small_diesel_euro4	v.km	Similaire mais pour la catégorie "petit", motorisation diesel et norme euro 4.
small_diesel_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "petit", motorisation diesel et norme euro 5.
small_petrol_euro3	v.km	Similaire mais pour la catégorie "petit", motorisation essence et norme euro 3.
small_petrol_euro4	v.km	Similaire mais pour la catégorie "petit", motorisation essence et norme euro 4.
small_petrol_euro5	v.km	Similaire mais pour la catégorie "petit", motorisation essence et norme euro 5.
coachPkm	p.km	Usage en passager.kilomètre des cars pour effectuer les déplacements inclus dans le périmètre d'étude durant les 2 années.
scooterPkm	p.km	Usage en passager.kilomètre des scooters pour effectuer les déplacements inclus dans le périmètre d'étude durant les 2 années.
BusPkm	p.km	Usage en passager.kilomètre des bus (et BHNS) pour effectuer les déplacements inclus dans le périmètre d'étude durant les 2 années.

3.3.6. Inventaire de cycle de vie de la navette automatisée

Le processus Mode-Autonome ci-dessus fait référence au modèle d'inventaire de cycle de vie de la navette automatisée. Il est issu du travail présenté dans le rapport (Kotelnikova et Feraille Fresnet, 2022) qui propose un modèle générique et paramétré des systèmes techniques de la mobilité automatisée.

Nous avons adapté ce modèle pour nos cas d'étude de deux manières. Premièrement, en contextualisant les providers associés à l'usage de la navette. En effet, le modèle générique s'appuie sur les providers en contexte global, y compris pour le mix électrique. Nous avons modifié les providers représentant ce mix afin d'utiliser les données du mix français pour l'usage de la navette et de ses équipements embarqués, pour l'ensemble des équipements débarqués (capteurs, UBRs, calculateurs débarqués, et également antennes cellulaires et réseau télécom). Nous avons fait l'hypothèse que les data centres hébergeant l'ensemble des données passant par le Cloud sont implantés en France et utilisent l'électricité du mix français. Enfin pour le monitoring et la supervision (utilisation d'un ordinateur de bureau) et routes (construction et maintenance), les providers sont pris en contexte Suisse, en l'absence de données plus représentatives.

Deuxièmement, en pilotant les scénarios des systèmes techniques par un ensemble de 124 paramètres afin que le modèle représente les hypothèses décrites dans la partie 2 sur la construction des scénarios. Les valeurs choisies pour chaque paramètre, selon le scénario modélisé, sont explicitées dans l'annexe du livrable 5.3.1/5.4.1. Le rapport (Kotelnikova, 2022) fournit des valeurs de paramètres de modélisation (pp.50 à 93). Ces valeurs constituent pour nous une base d'hypothèses avec deux limitations. Premièrement il s'agit, comme expliqué dans le rapport, d'ordres de grandeurs et elles doivent à ce titre, être à minima discutées, et faire l'objet d'études de sensibilité. L'estimation de ces paramètres pourra être affinée, suivant leur impact sur les résultats. Deuxièmement, il s'agit d'ordres de grandeurs issus des ateliers portant sur les véhicules légers automatisés – tous ne sont donc pas transposables au cas de la navette automatisée tels quels. Enfin, il s'agit de valeurs estimées dans le cas d'un service périurbain – certains paramètres sensibles au contexte devant donc être ajustés.

3.5. ANALYSES COMPLEMENTAIRES

Nous avons jugé utile de présenter les résultats d'impacts environnementaux non seulement pour l'ensemble de l'unité fonctionnelle, mais également en effectuant deux analyses complémentaires : le zoom et les impacts directs de la navette automatisée.

3.5.1. Zoom

Dans le cas de CASA, la navette joue un rôle complémentaire par rapport au service de BHNS. Elle a pour objectif de faciliter le rabattement du dernier kilomètre depuis l'arrêt du BHNS situé à l'entrée de l'avenue Roumanille, encourageant ainsi le report de la voiture particulière vers les transports en commun, spécifiquement le BHNS+navette. C'est la raison pour laquelle la zone d'influence couvre non seulement les déplacements réalisés à l'intérieur de l'avenue Roumanille mais également en lien (entrants et sortants) avec celle-ci.

Cependant il est utile d'analyser les conséquences de l'introduction de la navette automatisée sur le périmètre strict de l'avenue Roumanille. Nous nous interrogeons en effet sur les impacts environnementaux du service automatisé sur les déplacements de rabattement seuls. En effet, deux phénomènes de report modal des déplacements de rabattement sont en jeu lors de la mise en place du service de navette automatisée : le report modal de la voiture particulière vers la navette et le report modal de la marche (pour ceux qui venaient déjà en TC) vers la navette.

Un zoom sur les déplacements de rabattement permettra de voir si les gains du report de la VP vers la navette dépassent les pertes associées au report de la marche vers la navette.

Afin de réaliser l'évaluation environnementale pour le zoom, nous avons construit les données d'usage des différents modes pour le périmètre strict des déplacements de rabattement à partir des données d'usage des 5 cas d'étude en prenant les hypothèses suivantes :

- La demande du bus est ramenée à 0 car aucune partie du déplacement ne s'effectue sur l'avenue Roumanille ;
- La demande du car est ramenée à 0 car aucune partie du déplacement ne s'effectue sur l'avenue Roumanille ;
- La demande du scooter sur l'avenue Roumanille est calculée à partir du nombre de déplacements réalisés en scooter sur toute la zone d'influence multiplié par 0.55km (moitié de 1.1km) pris comme distance moyenne parcourue sur l'avenue Roumanille. Il s'agit en effet de déplacements de rabattement et on suppose une distribution uniforme des destinations sur toute la longueur de l'avenue ;
- De manière similaire, la demande des différentes catégories de voitures particulières est déterminée à partir de la demande de ces catégories sur toute la zone d'influence en estimant le nombre de déplacements associés (en divisant la demande totale exprimée en v.km par la portée moyenne d'un déplacement d'une voiture) et en le multipliant par 0.55 (raisonnement identique sur la distribution des destinations au sein de l'avenue Roumanille) ;
- La demande de la navette automatisée est inchangée car l'intégralité du déplacement s'effectue sur l'avenue Roumanille.

Ces traitements permettent de reconstituer les paramètres de demande, les autres paramètres de modélisation restant inchangés.

3.5.2. Impacts directs de la navette automatisée

En complémentarité de l'analyse sur l'ensemble de l'unité fonctionnelle, nous nous intéresserons dans ce travail aux impacts environnementaux directs de la navette, c'est-à-dire aux impacts produits par son exploitation dans les cas d'usage étudiés. Nous ramènerons les impacts calculés au véhicule.kilomètre (obtenus à partir du modèle Mode-Autonomie) au passager.kilomètre via le taux d'occupation, qui varie pour les deux terrains d'étude et les 5 cas étudiés. Dans le domaine d'évaluation environnementale des transports, il s'agit d'une unité de référence usuelle pour comparer l'efficacité intrinsèque des différents modes de transport.

Nous avons pour cela implémenté un processus dans OpenLCA, comme présenté dans le tableau suivant.

TABLEAU 13 : PROCESSUS PERMETTANT LE PASSAGE DES RESULTATS DES VEHICULES PAR KILOMETRE AU PASSAGERS PAR KILOMETRES (P.KM)

Flux d'entrée	Quantité	Unité	Provider
Mode-Autonomie	1/tx_occup_NA	v.km	Mode-Autonomie

Dans ce processus le paramètre tx_occup_NA représente le taux d'occupation (nombre moyen de passagers par véhicule) de la navette automatisée et diffère suivant les scénarios.

4. EVALUATION ENVIRONNEMENTALE

4.1. TERRAIN D'EXPERIMENTATION : CASA

Contrairement à l'analyse socio-économique, la pluralité des indicateurs de l'ACV suggère une comparaison directe des différents scénarios. Nous allons donc comparer les impacts des différents scénarios dans un même graphique, et cela pour chaque zone étudiée.

Pour le cas d'étude de CASA, nous allons comparer la valeur des indicateurs dans les différents scénarios sur la ZI, puis sur un zoom spécifique à l'Avenue Roumanille (Voir les modalités dans 3.5.1 ZOOM). Enfin nous comparerons seulement les impacts directs du véhicule automatisé dans les divers scénarios (Voir les modalités dans 3.5.2 Impacts directs de la navette automatisée).

Il n'y a pas de zoom dans le second cas d'étude de par la nature du service qui se veut indépendant d'un autre service de transport en commun. A Cœur de Brenne, les impacts des différents scénarios seront donc étudiés sur l'ensemble de la ZI, puis seul les impacts directs de la navette automatisée dans les divers scénarios seront analysés.

Enfin, un test de sensibilité sera réalisé sur un paramètre ayant un impact significatif dans les résultats.

4.1.1. Evaluation des impacts environnementaux : zone d'influence

Le graphique ci-après représente les impacts environnementaux des déplacements au sein de la zone d'influence et selon les différents scénarios. Les résultats sont présentés normalisés par rapport à la situation de référence.

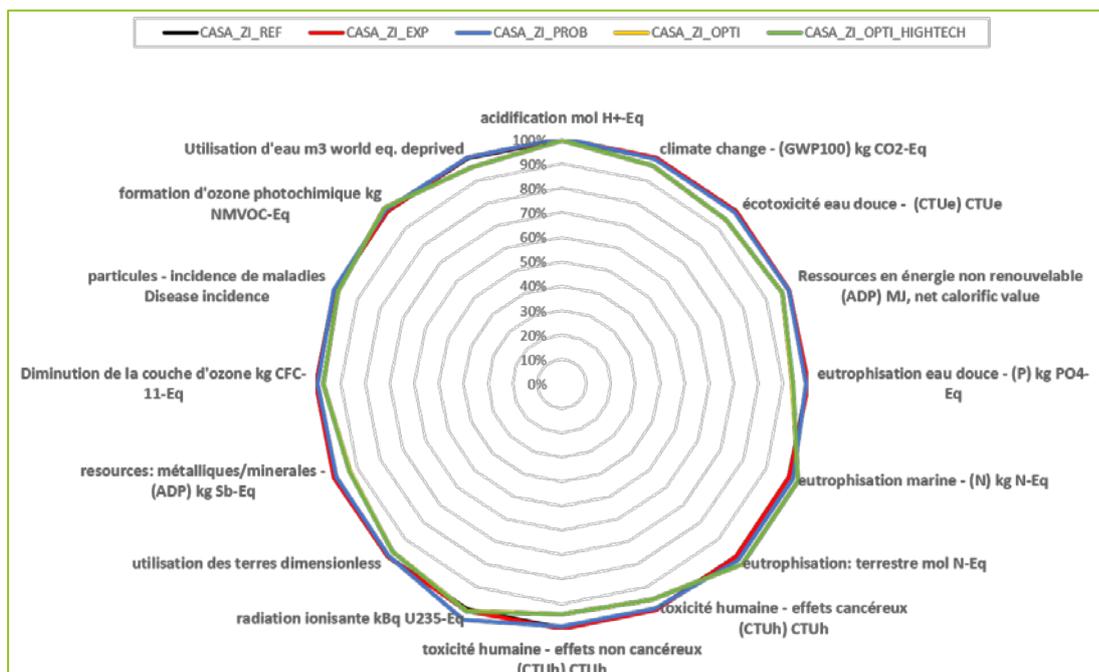


FIGURE 3 : IMPACTS DES DEPLACEMENTS AU SEIN DE LA ZI DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT A LA SITUATION DE REFERENCE

A une échelle normale de 0 à 100%, on ne distingue pas d'écarts significatifs d'impacts entre les différents scénarios. Pour analyser davantage ces résultats, il est utile de réduire la plage d'observation des variations : entre 90% et 110% (graphique).

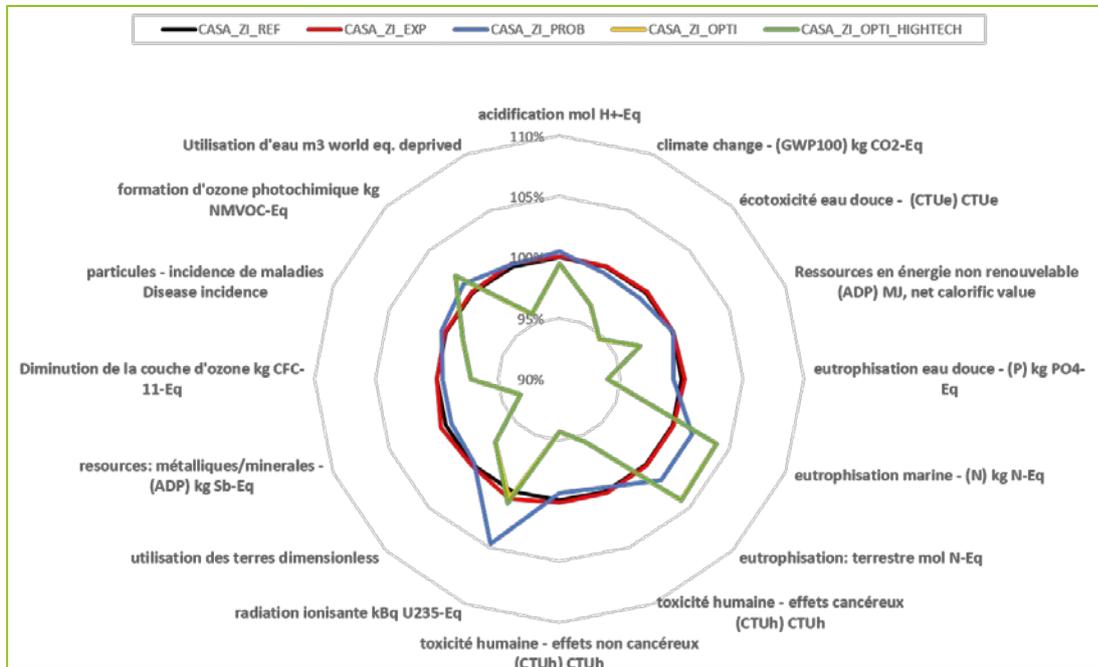


FIGURE 4 : IMPACTS DES DEPLACEMENTS AU SEIN DE LA ZI DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT A LA SITUATION DE REFERENCE

A cette échelle, il apparaît que les impacts de la situation de référence et de l'expérimentation sont quasiment confondus voire même légèrement supérieurs pour l'expérimentation. Cela s'explique par le fait que le seul report modal identifié dans le cas de l'expérimentation est de la marche à pied vers la navette. Il y a donc toujours les mêmes déplacements pour les autres modes et en plus la circulation d'une navette. On ne distingue pas les scénarios optimistes entre eux.

Lorsque qu'on observe l'ensemble des situations, on constate l'augmentation de certains impacts : les eutrophisations, la formation d'ozone photochimique et les radiations ionisantes. Les deux premières s'expliquent par un report modal des véhicules particuliers vers le bus. En effet, comme nous avons choisi d'utiliser une donnée générique de bus diesel, on se retrouve avec une surémission d'oxydes d'azote par rapport à un parc de véhicules légers en partie constitué de véhicule à essence. Cette surémission augmente ces deux catégories d'impacts. Il faut noter qu'en réalité, le BHNS qui circule à CASA est un bus à gaz donc cette surémission n'aurait pas eu lieu si on avait pu disposer d'une donnée générique d'un bus fonctionnant au gaz.

Les radiations ionisantes, elles, sont directement liées à la consommation d'électricité. Cette catégorie d'impact augmente donc dans le scénario probable avec une utilisation plus importante de la navette. La baisse constatée dans le scénario optimiste est contre intuitive, mais s'explique par un report modal des véhicules électriques vers les transports en communs (bus + navette). En effet, les résultats de l'enquête ont montré que des utilisateurs de véhicules électriques étaient prêts à changer de mode de déplacement.

On constate également que plusieurs indicateurs ont tendance à baisser surtout avec le scénario optimiste : les ressources, les toxicités et écotoxicité notamment. Toutes ces baisses s'expliquent par le report modal des véhicules légers vers les transports en commun : ici c'est l'effet de mutualisation du véhicule qui joue pleinement son rôle : moins de véhicules à fabriquer donc une meilleure efficacité énergétique.

Globalement, les hausses et baisses d'impacts oscillent entre -6% à +4% pour le scénario optimiste ce qui est peu significatif compte tenu des nombreuses hypothèses.

4.1.2. Terrain d'expérimentation CASA : Zoom

Le graphique ci-après représente les impacts environnementaux des déplacements effectués sur l'avenue Roumanille et selon les différents scénarios. Les résultats sont présentés normalisés par rapport à la situation de référence.

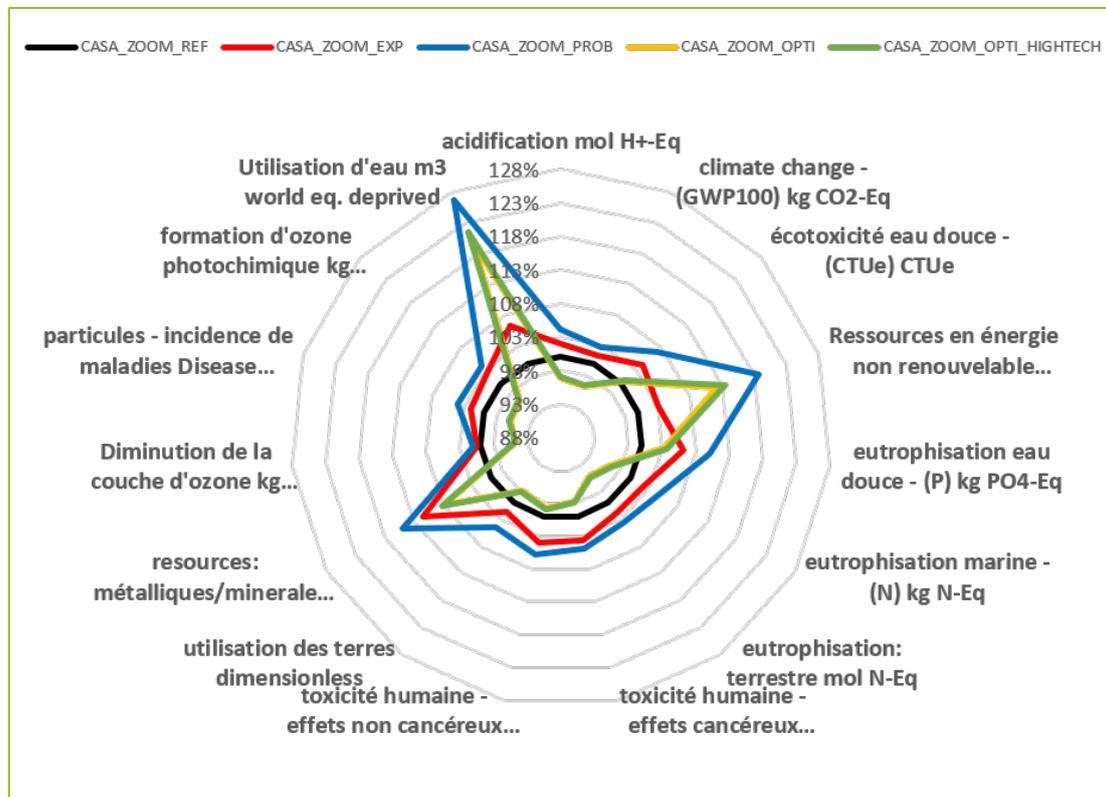


FIGURE 5 : IMPACTS DES DEPLACEMENTS EFFECTUES SUR L'AVENUE ROUMANILLE DANS LE DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT A LA SITUATION DE REFERENCE

Le ZOOM, défini préalablement (2.3.1) ne prend en compte que les déplacements de l'avenue Roumanille et pas les déplacements en amont. Concrètement, il n'y a plus les impacts liés aux transports en commun en dehors de la navette ni ceux liés aux déplacements en voiture hormis ceux effectués sur l'avenue.

L'allure du graphique est totalement différente car on voit apparaître trois impacts qui augmentent fortement. En réalité quatre car les radiations ionisantes ne sont pas représentées pour ne pas trop écraser les résultats. Ces augmentations ont toutes la même cause : la consommation d'électricité pour le mode autonome (véhicule, supervision et infrastructure). En effet, comme nous sommes sur des déplacements très courts, les gains amenés par le report modal ne sont pas suffisants pour compenser la consommation de la navette.

Contrairement à la ZI, on voit bien apparaître la différence entre la situation de référence et l'expérimentation mais on ne distingue toujours pas les deux scénarios optimistes.

4.1.3. Terrain d'expérimentation CASA : Mode autonome seul

Le graphique ci-après représente les impacts environnementaux du mode autonome seul ramené à la personne km (p.km). Les résultats sont présentés normalisés par rapport au scénario probable.

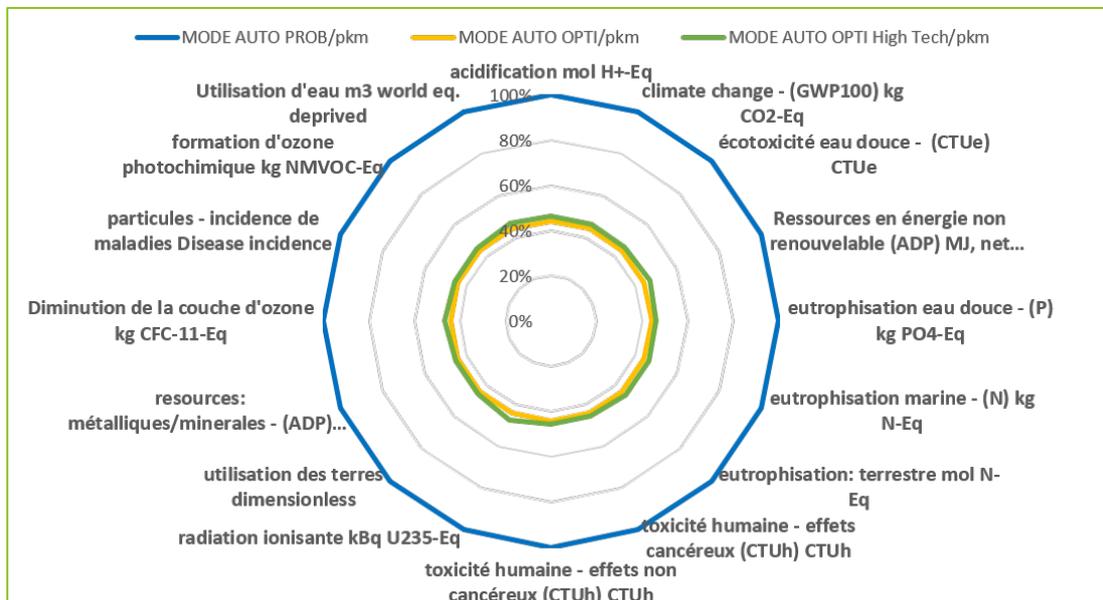


FIGURE 6 : IMPACTS DU SYSTEME AUTONOME PAR P.KM DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT AU SCENARIO PROBABLE

Ces résultats donnent les impacts pour chaque personne km selon les trois scénarios présentés. Dans cette représentation, le taux d'occupation de la navette à un effet majeur. C'est pourquoi on voit une nette différence entre le scénario probable et les deux scénarios optimistes.

Ces derniers en revanche restent très proches : ils ont le même taux d'occupation et seul le système technique diffère. Pour mieux distinguer la différence entre les deux scénarios optimistes, on peut supprimer le scénario probable, comme présenté ci-dessous.

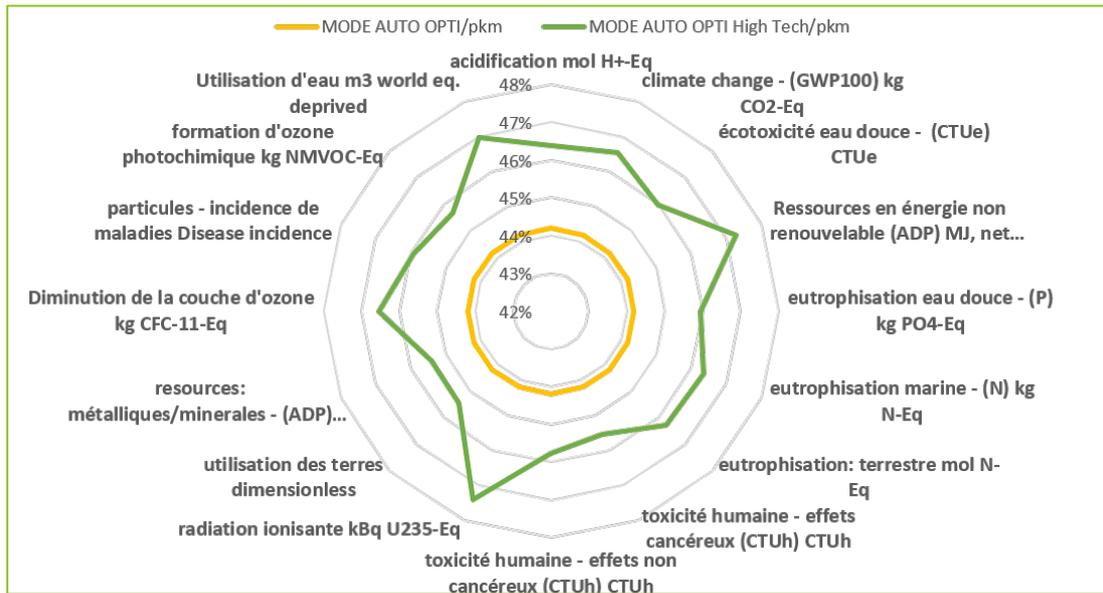


FIGURE 7 : IMPACTS DU SYSTEME AUTONOME PAR P.KM DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT AU SCENARIO PROBABLE

On perçoit cette fois les différences entre les deux scénarios mais les écarts sont faibles malgré tout car l'échelle va de 42% à 48%. Ces différences mineures d'impacts sont liées aux modifications du système technique dans sa version high-tech et décrites au paragraphe 2.3.1.

4.2. TERRAIN D'EXPERIMENTATION CŒUR DE BRENNE

4.2.1. Evaluation des impacts environnementaux : zone d'influence

Le graphique ci-après représente les impacts environnementaux des déplacements au sein de la zone d'influence et selon les différents scénarios. Les résultats sont présentés normalisés par rapport à la situation de référence.

Pour Cœur de Brenne, on constate d'emblée une allure de graphique différente qu'on peut expliquer par un nombre de mode plus restreint. En effet, il n'y a quasiment que l'utilisation des véhicules particuliers dans la situation de référence et pas de bus. Aussi, l'essentiel des reports vont des voitures vers la navette.

Une autre distinction apparaît comparée à CASA : on distingue une différence entre la situation de référence et l'expérimentation : les impacts de cette dernière étant plus importants (de 4% à 16%). Cet écart s'explique par la présence d'un service de co-voiturage dans la situation de référence qui disparaît dans les autres scénarios. Le retrait de ce service entraîne du report modal réparti entre la navette et les voitures particulières. Plus le scénario d'utilisation de la navette est favorable moins le report vers les voitures s'effectue jusqu'à être totalement absorbé par la navette. On constate sur le graphique qu'il faut pratiquement atteindre le scénario probable pour revenir à la situation de référence. Le système de navette autonome fait aussi bien qu'un service de covoiturage à partir d'un taux de remplissage proche de celui du scénario probable qui est de 4,4.

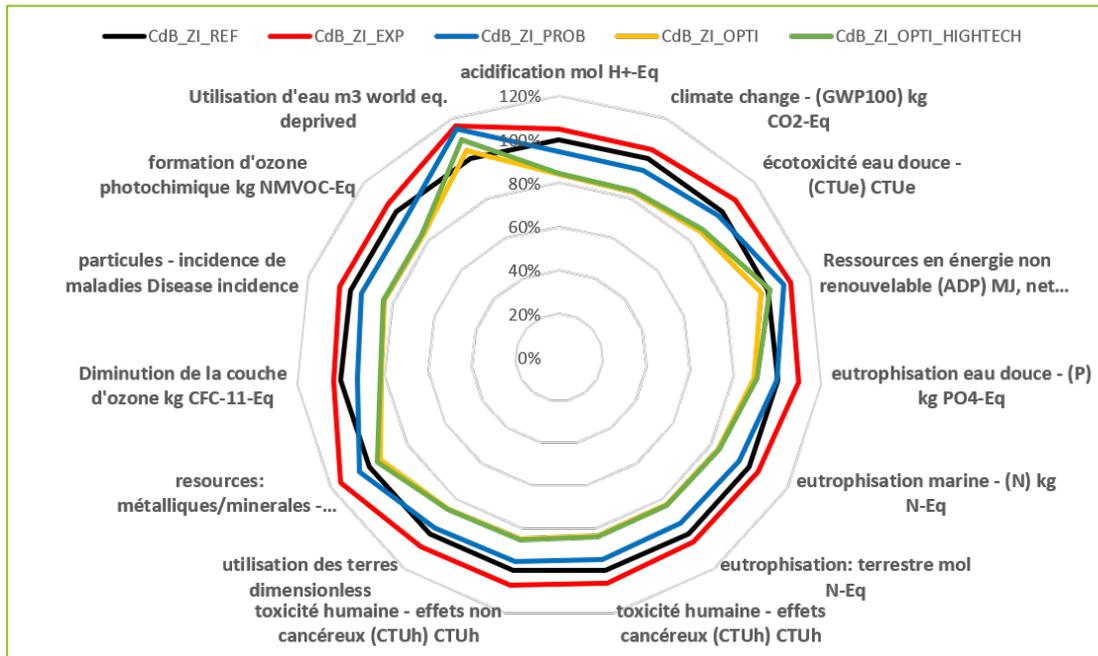


FIGURE 8 : IMPACTS DES DEPLACEMENTS AU SEIN DE LA ZI DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT A LA SITUATION DE REFERENCE

Enfin, une autre différence importante apparaît comparée à CASA : les scénarios optimistes sont susceptibles d’apporter des gains sensiblement plus importants. En effet, alors qu’à CASA, les différences d’impacts entre le scénario optimiste et la référence oscillent entre -6% et + 4%, à Cœur de Brenne, ils oscillent entre -17% et +4%. Cette tendance révèle un potentiel de gain d’impacts plus importants sur ce territoire.

4.2.2. Evaluation des impacts environnementaux : mode autonome seul

Le graphique ci-après représente les impacts environnementaux du mode autonome seul ramené à la personne km (p.km). Les résultats sont présentés normalisés par rapport au scénario probable.

On constate des résultats similaires à CASA, mais néanmoins avec moins d’écart entre le scénario probable et les scénarios optimistes. Cela s’explique par une différence de taux d’occupation moins importante à Cœur de Brenne entre le scénario probable et optimiste : on passe de 4,4 à 6,8 alors qu’à CASA on passait de 5,93 à 13,42.

La différence entre les deux scénarios optimistes s’explique par les différences du système technique décrites dans les hypothèses techniques de la situation de projet et ses scénarios (3.3).

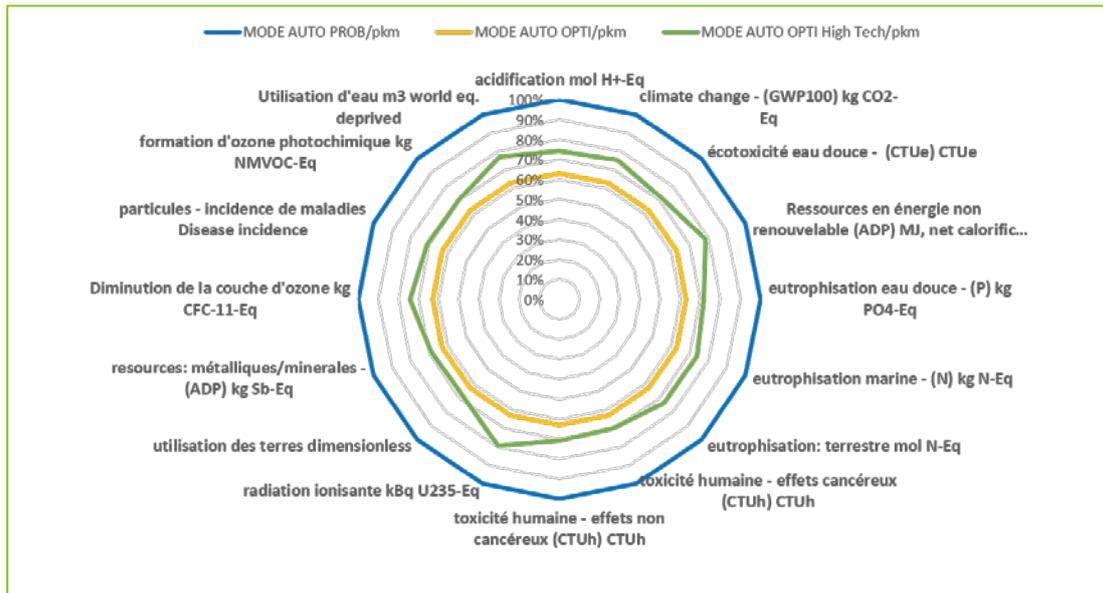


FIGURE 9 : IMPACTS DU SYSTEME AUTONOME PAR P.KM DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT AU SCENARIO PROBABLE

4.2.3. Analyse complémentaire : Sensibilité des résultats à certains paramètres

Un paramètre a été choisi pour tester la sensibilité des résultats : il s'agit du nombre de gigaoctets de vidéo transmis en streaming par heure. Ces tests de sensibilités sont présentés à partir du territoire d'expérimentation à CASA. On constate également les mêmes tendances dans l'expérimentation à Cœur de Brenne.

Dans les paragraphes précédents, ce paramètre était fixé à 180 Go/h. Il est ici divisé par 10 soit 18 Go/h. Les nouveaux résultats obtenus par pkm pour le scénario optimiste sont présentés dans le graphe ci-après.

Ce paramètre a une influence importante sur les impacts du mode autonome ramenés à la personne km. Les impacts sont réduits de 20% à 60% selon les cas. Cet écart s'explique par une diminution considérable de la part de la supervision dans les impacts. Si on visualise l'effet de ce changement de paramètre sur le ZOOM, on obtient la figure suivante.

On constate bien un "raboitage" des pics ce qui est normal puisque ces derniers étaient dus à de la consommation d'électricité.

A titre d'exemple, dans le scénario high tech, la consommation d'énergie du mode autonome passe de 18% (dont supervision 12%, véhicule 5%, infrastructure 1%) à 9% (dont supervision 2%, véhicule 6%, infrastructure 1%).

Ces résultats démontrent que le système technique est responsable d'une grande partie des impacts du bilan. Il semble donc nécessaire de porter une attention particulière à la conception de ce système technique, pour minimiser les impacts du bilan et particulièrement du véhicule automatisé.

Si on considère la zone d'influence totale, on ne distingue pas la variation des indicateurs faisant suite à la modification du paramètre, car les effets de cette modification sont écrasés par la part prépondérante des autres modes. Il est important de minimiser les impacts du mode autonome, mais que ce n'est pas un levier suffisant pour obtenir un excellent bilan environnemental.

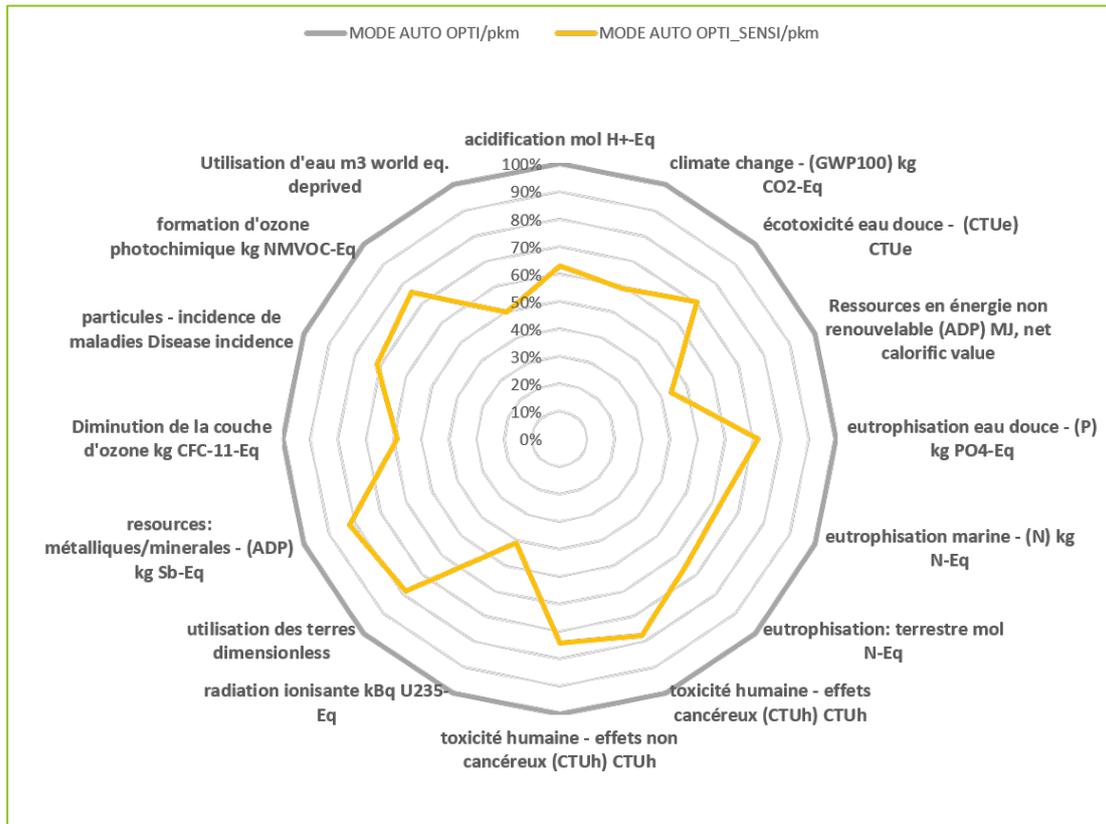


FIGURE 10 : SENSIBILITE DES IMPACTS PAR P.KM POUR LE SCENARIO OPTIMISTE

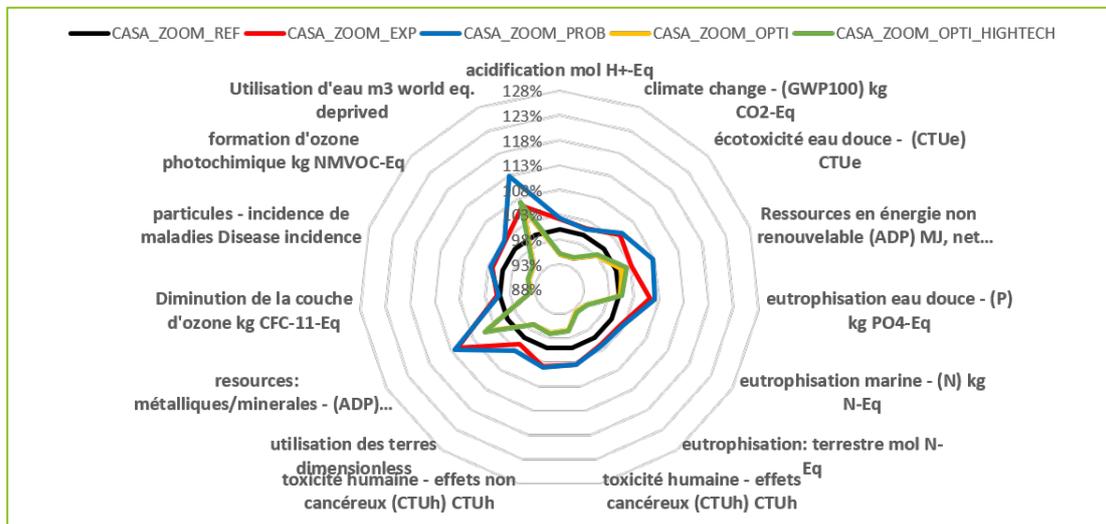


FIGURE 11 : TEST DE SENSIBILITE DES IMPACTS DES DEPLACEMENTS PASSANTS PAR L'AVENUE ROUMANILLE DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS NORMALISES PAR RAPPORT A LA SITUATION DE REFERENCE

5. EVALUATION SOCIOECONOMIQUE

5.1. TERRAIN D'EXPERIMENTATION : CASA

5.1.1. Situation de référence

Dans le domaine de l'évaluation socioéconomique de projets, la situation de référence est celle qui prévaudrait si le projet n'est pas réalisé. Par rapport au précédent livrable consacré à la construction du cadre méthodologique (Bouzouina et al., 2021), nous avons effectué une modification de la situation de référence en abandonnant le service de vélo en libre pour la desserte du dernier kilomètre car son fonctionnement serait impacté par le relief de la zone étudiée. Nous avons donc préféré nous intéresser à la possibilité pour les entreprises de mettre en places les bornes de rechargement pour les véhicules électriques, afin de réduire l'espace dédié au stationnement au niveau du dernier kilomètre. Nous conservons également la mise en place du service de BHNS en site propre (comme supposé dans le livrable 1.2.1). Cette situation de référence repose sur les hypothèses suivantes :

- L'installation de 11 bornes de rechargement au niveau de l'ensemble des entreprises qui prendront également en charge les coûts liés à l'exploitation ainsi qu'à leur usage ;
- Nous supposons deux recharges hebdomadaires par véhicules soit 208 recharges pour un coût de la recharge de 5,75€ par véhicule ;
- Un temps de parcours moyen de 25 minutes pour réaliser un trajet domicile-travail et une distance moyenne de déplacement d'environ 20km ;
- Un temps de parcours de 20 minutes pour l'utilisation du BHNS suivi d'un temps de marche à pied d'environ 13 minutes. Nous conservons l'hypothèse d'un report modal de 38 usagers de la VP vers l'usage du BHNS réalisé dans le livrable 1.2.1.

Dans ce scénario de référence, la mise en place des bornes de rechargement sur l'avenue Roumanille impacte quatre acteurs sur le territoire.

Les entreprises sont impactées négativement par la mise en place des bornes au niveau de leur parking notamment à cause des coûts financier liés à leur usage. Il est à noter que le bilan négatif regroupe l'ensemble des entreprises présentes sur l'avenue Roumanille, l'installation des bornes par entreprises est donc moins coûteuse que le résultat observé.

L'Etat dispose d'un bilan positif de 229 800€, lié à la perception des recettes via la TVA sur l'installation des bornes et à leur exploitation sur le périmètre d'étude. Les pertes de recette liées au report modal vers l'usage du BHNS restent marginales par rapport au gain de la TVA.

Le territoire conserve un bilan neutre, car ce dernier ne finance pas les bornes de rechargement installés par les entreprises, et ne perçoit pas de recette liée au BHNS dont l'usage est gratuit.

Le bilan de l'utilisateur est positif de plus 28 000€, le surplus perçu par ce dernier provient de la prise en charge des coûts liés au rechargement du véhicule par l'entreprise.

En termes de coût généralisé, on considère que la situation de référence n'a pas d'influence sur le temps de parcours des usagers des VP, mais a une influence positive sur les coûts de transport des usagers des véhicules électriques. Le bilan des anciens usagers VP étant neutre, la comparaison du gain lié à l'absence du coût du transport avec le temps de parcours valorisé par la valeur du temps attribué au trajet domicile-travail nous donne un surplus négatif pour ces usagers.

Nous avons donc dû intégrer une constante afin de prendre en compte dans le calcul du coût généralisé des éléments comme la délégation de conduite, la pénibilité liée à l'usage de la voiture. On attribue une valeur monétaire globale fixe afin de rendre nul le bilan de ces usagers.

5.1.2. Scénario d'expérimentation

La réalisation du scénario d'expérimentation se base sur les performances observées du service de navette automatisée durant l'expérimentation qui a eu lieu sur l'Avenue Roumanille entre le mois d'avril 2022 et le mois d'août 2022.

Nous avons donc réalisé les hypothèses suivantes :

- Nous supposons, tout comme pour la situation de référence, la mise en place de la ligne de BHNS en site propre pour une comparaison d'usage de ce service équivalent avec la situation de référence ;
- 2 navettes réalisent le service du dernier kilomètre ;
- La vitesse commerciale de la navette est de 9km/h, pour un temps de parcours moyen de 9 minutes et un temps d'attente moyen de 3 min ;
- Le demande moyenne journalière pour le service est de 10 usagers. Nous n'observons aucun report des usagers de la voiture vers la navette en termes de véhicule kilomètre, nous avons donc un report de la marche à pied vers l'usage de la navette ;
- Un taux d'actualisation de 3,2% et une année de référence fixée à 2021

TABLEAU 14 : ANALYSE SOCIOECONOMIQUE DU SCENARIO D'EXPERIMENTATION SUR CASA

Scénario expérimentation	
Résultats	Scénario expérimentation
VAN-SE	- 228 000 €
VAN	- 198 000 €
Bilan par acteur	
Bilan projet pour AOT	- 684 000 €
Bilan pour les entreprises	1 171 000 €
Bilan projet pour l'opérateur STPA	- 737 000 €
Etat	- 52 000 €
Usagers	- 28 000 €
Gains environnementaux	- 2 000 €
Accidents mortels évités	- €

La mise en place et l'expérimentation du service de navette automatisée sur l'avenue Roumanille impacte cinq acteurs :

L'Autorité Organisatrice des transports enregistre un bilan négatif (-684 000€) lié en grande partie à l'investissement de l'infrastructure pour mettre en place le service de navette automatisée sur le territoire ainsi que la rémunération supposée de l'opérateur pour réaliser le service pendant l'expérimentation. Tout comme la situation de référence, le service de BHNS ainsi que le service de navette sont gratuits, ce qui signifie que le territoire ne récupère aucune recette à l'issue de l'exploitation de ces deux services collectifs.

Le bilan des entreprises devient quant à lui positif dans le scénario expérimentation par rapport à la situation de référence, car l'investissement et l'exploitation des bornes n'est pas réalisé dans la situation de mise en place de la navette. Nous avons donc un gain de 1 171 000€ par rapport à la situation de référence.

Le bilan de l'opérateur est également négatif de -737 000€. Ce bilan est notamment lié à l'achat des deux véhicules pour réaliser le service. De plus, ce dernier prend également en compte les coûts d'exploitation des deux navettes. Sans recette issue du titre de transport, les seuls gains perçus par l'opérateur sont la rémunération versée par l'AOT pour le service réalisé.

Le bilan de l'Etat est quant à lui positif avec un gain de 52 000€ lié à la TVA reçue par l'investissement et les coûts d'exploitation plus important que dans la situation de référence. De plus, le service de navette ne crée pas de report modal depuis la voiture, ce qui signifie qu'il n'y a pas de perte liée à la taxe sur le carburant.

Le bilan de l'utilisateur est quant à lui négatif par rapport à la situation de référence de -28 000€. Cette différence s'explique par l'addition du temps de parcours de la navette et du temps d'attente (compté doublement dans l'évaluation socioéconomique), ce qui rend le temps total en navette supérieur au temps de marche à pied. Avec les conditions d'expérimentation, il n'y a donc pas de gain pour l'utilisateur qui se déplaçait à pied. De plus, sans report de la voiture vers la navette le bilan des anciens usagers de la voiture reste nul, ce qui implique un bilan global de l'utilisateur en situation d'expérimentation inférieur à celui observé en situation de référence.

Le bilan environnemental est négatif avec une valeur de -2 000€ par rapport à la situation de référence. Cela s'explique par l'absence de report modal d'un véhicule motorisé et la mise en place d'un nouveau mode de transport uniquement utilisé par les anciens piétons. La réalisation commune avec l'évaluation environnementale permet de connaître l'impact global au niveau des émissions de CO₂ de la navette dans une situation sans report modal. Il n'est cependant pas possible de prendre en compte les effets liés à la pollution atmosphérique liée à la navette à cause de la valeur de monétarisation prescrite dans le rapport Quinet. Cette dernière correspond à la valeur de pollution pour 100 véhicule/km ce qui nous donnerait une valeur quasi-nulle pour la navette.

Nous avons donc une VAN-SE et une VAN négatives pour la situation d'expérimentation du service de navette automatisée par rapport à la situation de référence, avec des valeurs respectives de -228 000€ et de -198 000€. Le projet n'est donc pas rentable en cas d'exploitation du service dans les mêmes conditions que celles observées au cours de l'expérimentation. Nous pouvons noter que ce projet entraînerait des effets négatifs d'un point de vue collectif avec notamment un bilan de l'utilisateur et de l'environnement qui se dégrade par rapport à la situation de référence.

L'évaluation du scénario d'expérimentation s'appuie également sur une analyse qualitative de l'enquête de mobilité pour laquelle nous avons obtenus 13 commentaires en lien avec le service de navette expérimentée sur le territoire. Nous avons pu séparer ces commentaires en trois catégories : 1) le fait de ne plus avoir de conducteur, 2) le fonctionnement de la technologie autonome et 3) l'évolution de cette dernière. Bien que ces effets ne soient pas quantifiables à l'aide d'une valeur monétaire, il est tout de même possible d'identifier un impact positif ou négatif pour ces derniers. L'autonomie de la navette semble être perçue négativement par les répondants de notre enquête pour les raisons suivantes :

Tout d'abord, l'absence du conducteur/opérateur du véhicule implique la perte d'un contact humain/social entre l'utilisateur et l'opérateur de transport. D'autres répondants se posent des questions sur la sécurité à l'intérieur du véhicule comme cet individu qui se demande « si un problème arrive dans ces transports sans chauffeurs qui peut intervenir ? ».

Ensuite, concernant les effets perçus par l'autonomie pendant l'expérimentation, les répondants ont pour la plupart un avis négatif sur la navette autonome actuellement en expérimentation. Certains pointent la vitesse trop lente du service entraînant une hausse de la congestion sur le trafic : « la navette actuelle perturbe grandement la circulation qui n'est déjà pas facile à St Philippe ». De plus, la technologie semble avoir certaines lacunes au niveau du parcours à réaliser d'après l'un des répondants. La navette peut être bloquée à cause de la présence des arbustes qui peuvent rentrer dans la bulle de protection de la navette et stopper cette dernière. Le dernier problème indiqué vient de la communication quasi-inexistante entre les usagers de la voiture avec la navette à cause de l'absence d'un chauffeur. En effet, un usager de la voiture nous indique que lors des intersections et des sorties de parkings à proximité de la navette, ce dernier ne sait pas s'il peut s'engager car la navette ne possède pas de signaux lui permettant de faire passer une information aux autres usagers de la route.

Enfin, pour les évolutions de cette technologie, certains indiquent que le véhicule autonome participe à une « déshumanisation de la société » et perçoivent donc mal le développement de cette forme de mobilité. D'autres personnes pensent que cette forme de mobilité n'est tout simplement pas viable car cette dernière ne répond pas « aux enjeux écologiques et sociaux du territoire » ou bien que « l'augmentation des puissances de calcul n'améliore pas la situation. Au contraire, une navette autonome sur route a trop de cas imprévus à gérer, il y aura des accidents. ».

Les avis sur la mobilité autonome montrent que la prise en compte de variables psychosociales semble être importante dans le cadre de l'évaluation socioéconomique, car ce mode de transport apporte de nouvelles interrogations à la fois pour les usagers du service mais également pour les autres usagers de la route. Une manière de prendre en compte cette mauvaise perception de la mobilité autonome serait de se servir de l'inconfort dont l'objectif est d'appliquer un coefficient multiplicateur sur le temps réel perçu par l'utilisateur durant son trajet. Cependant, cet inconfort est pour le moment uniquement pris en compte en fonction du taux de charge d'un véhicule de transport en commun. Il doit donc être amélioré de manière à prendre en compte de nouvelles sources d'inconfort comme l'insécurité à l'intérieur d'un véhicule autonome public ou la cohabitation avec une nouvelle forme de mobilité avec laquelle il est plus compliqué de communiquer.

5.1.3. Scénario probable

Pour réaliser l'évaluation socioéconomique du scénario probable, basé sur les comportements, nous avons réalisé les hypothèses suivantes concernant les améliorations du service :

- La vitesse de la navette passe à 30 km/h avec un temps d'attente réduit de moitié, ce qui nous donne un temps de parcours total de 6 min pour réaliser le trajet sur le dernier kilomètre en navette ;
- Les coûts liés aux dépenses énergétiques augmentent de manière proportionnelle aux gains de vitesse de la navette (coût multiplié par trois) ;
- Nous ne prenons pas en compte les éléments liés à la surcharge de capacité du véhicule pour ne pas impacter les gains observés par des coûts de mise en place d'un nouveau véhicule ;
- Nous ne prenons pas en compte l'hypothèse d'augmentation du temps pour trouver une place de parking pour les usagers de la voiture car nous ne nous intéressons qu'à l'impact direct de la navette sur le dernier kilomètre ;
- Nous supposons une fréquentation journalière moyenne de 498 usagers avec 202 anciens usagers de la voiture et 296 anciens piétons ;
- Un taux d'actualisation de 3,2% et une année de référence fixée à 2021.

TABLEAU 15 : ANALYSE SOCIOECONOMIQUE DU SCENARIO PROBABLE SUR CASA

Scénario probable	
Résultats	Scénario Probable
VAN-SE	- 398 000 €
VAN	- 602 000 €
Bilan par acteur	
Bilan projet pour AOT	- 684 000 €
Bilan pour les entreprises	1 171 000 €
Bilan projet pour l'opérateur STPA	- 1 233 000 €
Etat	144 000 €
Usagers	158 000 €
Gains environnementaux	45 000 €
Accidents mortels évités	1 000 €

La réalisation de l'analyse coût avantage entre le scénario Probable et le scénario de référence nous donne une variation des bilans des acteurs suivants :

L'opérateur voit son bilan diminuer davantage par rapport à la situation d'expérimentation, à cause de la hausse des coûts d'exploitation liés à l'amélioration du service de navette à 30km/h pour les deux navettes utilisées sans réception de recette supplémentaire. Ainsi, le bilan de ce dernier se dégrade et enregistre une différence de -684 000 € par rapport à la situation de référence

Le bilan de l'Etat augmente quant à lui, avec un gain de 144 000 €, grâce à TVA perçue par les dépenses d'exploitation supplémentaire pour le service. En revanche, contrairement au scénario expérimentation, nous avons ici une baisse des recettes obtenus par l'Etat via la taxe carburant à cause du report modal de la voiture vers l'usage des transports collectifs (BHNS + navette ou navette seule).

Le bilan de l'utilisateur s'améliore également grâce à la hausse de performance du service avec un gain de 158 000€ dû aux gains de temps perçus par les utilisateurs du BHNS et de la marche à pied pour les trajets domicile-travail et pour les piétons dans les déplacements réalisés à l'intérieur du dernier kilomètre. Le bilan des usagers de VP est considéré comme nul en cas d'utilisation du service de navette (combiné avec le BHNS ou non) car la réduction de temps de parcours ne permet de combler la différence par rapport au coût du transport. Il n'y a donc pas de surplus dégagé par l'utilisateur de la voiture lors de son usage de la navette. Nous supposons donc comme dans le cas de l'expérimentation que certains facteurs non quantifiables de manière individuelle jouent sur le coût généralisé de l'utilisateur de la voiture, permettant de l'inciter à effectuer le report vers la navette. Le bilan positif pour l'utilisateur est donc uniquement lié au gain de temps par rapport à la marche (il n'est pas possible d'augmenter la vitesse de la navette au-delà de 30km/h, car il s'agit de la vitesse maximale autorisée sur l'avenue Roumanille, le bilan de l'utilisateur ne peut donc pas devenir positif à partir des données que nous avons à disposition).

Les reports effectués de la voiture vers l'usage des transports collectifs permettent de réduire les émissions de CO2 et la pollution atmosphérique via les particules fines liés à la circulation de ces véhicules. Nous observons donc un bilan environnemental qui devient positif par rapport à la situation d'expérimentation et qui permet un gain de 45 000€ par rapport à la situation de référence

Le report modal observé joue également de manière proportionnelle à la réduction de l'accidentalité. Pour CASA, nous observerons uniquement le report modal pour les trajets domicile-travail pour lesquels la vitesse des véhicules risque d'entraîner plus d'accident avec plus de gravité que les trajets réalisés dans le dernier kilomètre avec une vitesse réduite. Dans le cas du scénario Probable, nous avons une réduction des véhicules kilomètres réalisés de 2% ce qui nous donne des gains liés à la réduction de l'accidentalité de 1 000€

L'ACA du scénario probable, basé sur les comportements, montre de meilleurs résultats pour le bilan de l'utilisateur grâce à un gain de temps pour les anciens piétons, mais également un meilleur bilan environnemental à la suite du report modal des usagers de la VP vers l'usage des transports collectifs. Cependant, les gains associés à ces deux bilans ne sont pas suffisants par rapport à la hausse des coûts d'exploitations liés à l'amélioration de la performance du service à 30km/h. Ce scénario probable montre donc une VAN-SE et VAN négatives encore plus déficitaires que celles du scénario d'expérimentation. Le prochain scénario nous permettra de voir si la hausse de la demande à un niveau optimiste peut améliorer les résultats du projet au point de rendre ce dernier rentable à réaliser.

5.1.4. Scénario optimiste

La réalisation de l'évaluation socioéconomique suivant le scénario optimiste de l'usage du service de navette autonome s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- Nous conservons les mêmes hypothèses de performances du service que celles choisies dans le scénario Probable.
- Le changement effectué se trouve au niveau de la demande pour le service qui passe à 1852 usagers par jours avec 943 anciens usagers de la voiture et 909 usagers des TC et/ou de la marche. Cette hypothèse reposant sur les intentions des enquêtés n'est pas réaliste, mais l'objectif de l'exercice est de tester son impact sur les bilans socioéconomique et environnemental et de situer les marges d'évolution.
- Un taux d'actualisation de 3,2% et une année de référence fixée à 2021

TABLEAU 16 : ANALYSE SOCIOECONOMIQUE DU SCENARIO OPTIMISTE SUR CASA

Scénario Optimiste	
Résultats	Scénario Optimiste
VAN-SE	36 000 €
VAN	- 637 000 €
Bilan par acteur	
Bilan projet pour AOT	- 684 000 €
Bilan pour les entreprises	1 171 000 €
Bilan projet pour l'opérateur STPA	- 1 233 000 €
Etat	109 000 €
Usagers	483 000 €
Gains environnementaux	185 000 €
Accidents mortels évités	5 000 €

La réalisation de l'analyse coût avantage du scénario Optimiste par rapport au scénario de référence nous donne une variation des bilans des acteurs suivants.

Le bilan de l'Etat augmente de 109 000€ par rapport à la situation de référence. Comparé au scénario Probable, on observe une hausse du bilan plus faible en raison du report modal de la voiture vers l'usage des transports collectifs. Ceci réduit la recette perçue par l'Etat sur la taxe sur le carburant, avec une différence d'environ -35 000€ par rapport au scénario Probable.

Le bilan de l'utilisateur augmente de 483 000€ par rapport au scénario expérimentation. Tout comme le cas du scénario Probable, la hausse de ce bilan est uniquement due aux gains de temps réalisés par rapport à la marche à pied. La différence avec le scénario Probable est liée aux reports modaux de la marche vers la navette, qui sont environ 3 fois plus importants dans le scénario Optimiste.

Le bilan environnemental augmente quant à lui de 185 000€ par rapport au scénario de référence, grâce au report modal de la voiture vers les TC qui est plus fort dans ce scénario.

La réalisation de ce scénario suppose une réduction du nombre de véhicule kilomètre de 8% ce qui vient jouer sur le nombre d'accidents de manière proportionnelle. Nous obtenons donc une hausse des gains liés aux accidents évités de 5 000€ par rapport à l'expérimentation et de 4 000€ par rapport au scénario Probable.

En comparant ce scénario optimiste basé sur les intentions d'usage avec le scénario d'expérimentation, nous pouvons constater qu'à l'exception du bilan de l'opérateur, les acteurs présentent des résultats plus positifs. Le bilan de l'utilisateur couvre à 97% la hausse des coûts d'exploitation de l'opérateur par rapport au scénario expérimentation. Nous obtenons une VAN-SE positive de 36 000€ par rapport au scénario de référence. La réalisation d'un projet de navette automatisée avec des performances et une demande similaire est donc plus rentable à réaliser que la mise en place des bornes électriques au niveau des parkings de l'avenue Roumanille, et de l'usage de la marche pour compléter le dernier kilomètre à la suite du BHNS. Il reste important de rappeler que ce scénario ne prend pas en compte les limites de capacité des navettes, et que l'ajout d'un véhicule sera certainement nécessaire pour répondre à une telle demande. Ceci augmentera les coûts d'exploitation pour l'opérateur, et réduira donc la VAN et la VAN-SE qui deviendront négative.

Enfin, il ne faut pas oublier l'objectif principal des expérimentations qui consiste à produire de la connaissance sur les différents éléments liés à la mise en place de ce nouveau service de navette autonome. La production de la connaissance est un élément important à prendre en compte dans l'exercice d'évaluation. Les subventions publiques apportées à ce projet témoignent de son importance, mais il est difficile à quantifier et à intégrer dans le bilan socioéconomique de l'expérimentation.

Le montant des subventions publiques permet de combler le manque à gagner lié aux coûts importants comme l'investissement de l'infrastructure, l'achat de matériel roulant ou encore les coûts d'exploitation. Dans le cas de CASA, deux acteurs publics sont impliqués dans la subvention de l'expérimentation du projet.

L'ADEME est le principal financeur des expérimentations dans le cadre du projet ENA. L'ADEME finance 42 % des coûts associés à l'expérimentation. Dans le cadre du scénario expérimentation, cela représente un financement d'environ 84 000€ pour combler le manque financier à gagner par rapport à la situation de référence. Dans le cas des deux scénarios d'amélioration du service, le montant de subvention apporté par l'ADEME augmenterait pour combler principalement la hausse des coûts d'exploitation du service. Le montant nécessaire est compris entre 254 000€ et 270 000€ selon le scénario envisagé.

Le second acteur contribuant au soutien financier est le territoire sur lequel l'expérimentation a lieu. Ici, nous supposons une participation financière de CASA à hauteur de 20 % de la VAN financière. Le montant s'élève donc à environ 40 000€ pour la situation d'expérimentation et à plus de 120 000€ pour les scénarios d'amélioration du service.

TABLEAU 17 : SYNTHES DES SUBVENTIONS NECESSAIRES POUR LES DIFFERENTS SCENARIOS PAR RAPPORT A LA SITUATION DE REFERENCE

Synthèse des subventions nécessaires en fonction des scénarios			
Résultats	Expérimentation	Probable	Optimiste
VAN-SE	- 30 000 €	204 000 €	673 000 €
VAN	- €	- €	- €
Subvention			
Montant total des subventions	198 000 €	602 000 €	637 000 €
ADEME	- 83 655 €	- 254 345 €	- 269 133 €
CASA	- 39 600 €	- 120 400 €	- 127 400 €
Autres financeurs	- 74 745 €	- 227 255 €	- 240 468 €
Usagers	- 28 000 €	158 000 €	483 000 €
Gains environnementaux	- 2 000 €	45 000 €	185 000 €
Accidents mortels évités	- €	1 000 €	5 000 €

Le troisième acteur est un regroupement des autres financeurs du projet. Pour CASA, nous n'avons pas d'informations sur ces différents acteurs. Nous pouvons cependant supposer que l'Etat fait parti de ces acteurs grâce au fond de compensation de la TVA (FCTVA). Nous pouvons également émettre l'hypothèse de la participation d'acteur comme la région Provence Alpes-Côtes d'Azur. Nous utiliserons une part de financement similaire à celle de CdB pour cet acteur, à savoir 37,75 % de la VAN.

Ces montants de subventions sont variables selon le scénario. Dans le cas du scénario de l'expérimentation, le montant total des subventions pour le service de navette autonome est d'environ 198 000€. Ce montant n'est cependant pas suffisant pour combler le surplus négatif lié au bien-être collectif à cause de l'absence de report modal de la voiture vers l'usage des transports collectifs. Si la valeur liée à la production de la connaissance est jugée supérieure au montant des subventions, alors le projet d'expérimentation est tout à fait justifié. Pour le scénario Probable, le montant de subvention nécessaire pour l'exploitation et la production de connaissance du service automatisé est d'environ 600 000€. Nous pouvons supposer que la hausse de vitesse du service apporte de nouvelles connaissances sur le système qui peuvent justifier cette augmentation de subvention apportée. Cet apport financier permet de neutraliser la VAN et d'observer une VAN-SE positive de 204 000€ par rapport à la situation de référence. Selon le scénario probable, le projet peut être rentable d'un point de vue collectif par rapport à la mise en place des bornes électriques au niveau des entreprises. Il offre également un gain de temps pour les usagers de la marche à pied. Le même constat peut être réalisé dans le cas du scénario Optimiste. Le montant de subventions nécessaires a augmenté, à cause du report modal de la voiture vers les TC qui réduit les recettes de l'Etat sur la taxe liée au carburant. Ceci nécessite un financement supplémentaire pour combler le manque à gagner. La neutralisation de la VAN permet d'obtenir une VAN-SE positive de 673 000€ par rapport à la situation de référence. Le projet est également susceptible d'être rentable d'un point de vue collectif, grâce à une hausse du report modal VP et piéton, mais les hypothèses sur la demande et l'offre ne sont pas réalistes.

5.2. TERRAIN D'EXPERIMENTATION : CŒUR DE BRENNE

5.2.1. Situation de référence

Comme constaté dans le livrable 5.3.1 du projet ENA, le choix de la situation de référence de CdB implique la mise en place d'un service de covoiturage au niveau des communes d'expérimentation de la navette.

Pour rappel, les principales hypothèses utilisées pour la mise en place de ce scénario sont :

- Une demande journalière de 10 usagers qui utilisaient la voiture pour réaliser leur déplacement ;
- Un taux d'occupation de deux personnes par véhicule qui implique la nécessité de cinq chauffeurs pour réaliser le service ;
- L'installation de deux places de parking dédiés au covoiturage au niveau de chacune des quatre communes d'exploitation ;
- Un coût de 0,25€/km pour l'utilisation du service.

Dans ce scénario de référence, nous avons identifié 6 acteurs pouvant être impactés par la mise en place du service de covoiturage.

Le territoire possède un bilan négatif de -20 000€, en raison de l'installation des places de parking dédiées au service. De plus, seul le chauffeur est payé lors de l'utilisation du service. La communauté de commune ne perçoit donc pas de recette issue de l'exploitation.

Les chauffeurs ont également un bilan négatif de -1 000€. La prise en compte du coût d'usage et du coût de maintenance du véhicule créent un déficit en l'absence de recettes issues des passagers. Le prix fixé pour le voyage n'est pas assez important ou bien, ce tarif n'est pas adapté pour le transport d'uniquement un passager par véhicule.

L'Etat quant à lui, possède un bilan positif lié à la TVA récoltée pour la mise en place et l'exploitation du service. Les pertes liées à la taxe TICPE restent marginales par rapport aux gains obtenus grâce au service (installation, maintenance, prix du service).

L'usager dispose d'un bilan négatif uniquement lié au prix du transport. On suppose que le temps de parcours de l'usager ne change pas en cas d'usage du service en raison de l'abandon d'un mode de transport avec les mêmes caractéristiques. Ici, le coût du service permet de créer du confort dans le trajet de l'usager. Ce confort dans l'usage de la voiture ne possède pas de valorisation monétaire, il y a donc un effet positif pour l'usager, mais il n'est pas quantifiable.

Concernant le bilan environnemental, ce dernier est positif en raison de l'abandon total de l'usage du véhicule pour les usagers du covoiturage. Le gain environnemental est donc lié à la réduction du nombre de véhicules sur la route. Nous supposons un gain au niveau de la pollution atmosphérique via particules fines (PM 2.5 et PM10), une réduction des émissions de CO2 ainsi qu'une diminution des nuisances sonores.

5.2.2. Scénario d'expérimentation

Le scénario d'expérimentation consiste à la mise en place du service d'un service de navette automatisée sur le territoire de cœur de Brenne avec les caractéristiques suivantes :

- Une vitesse maximale de 50km/h sur les routes départementales permettant de joindre les différentes communes ;
- Une distance moyenne de 11km parcourue par les usagers du service (2 arrêts) et un temps de parcours moyen de 22 min ;
- Une fréquentation moyenne journalière de 9 usagers, d'après les données de Berthelet avec un report total depuis la voiture ;
- Un taux d'actualisation de 3,2% et une année de référence fixée à 2021

TABLEAU 18 : ANALYSE SOCIOECONOMIQUE DU SCENARIO D'EXPERIMENTATION A CŒUR DE BRENNE

Scénario expérimentation	
Résultats globaux	Scénario expérimentation
VAN-SE	- 1 502 000 €
VAN	- 1 499 000 €
Bilan par acteur	
Bilan projet pour AOT	- 415 000 €
Bilan projet pour l'opérateur STPA	- 1 290 000 €
Bilan projet pour les chauffeurs	5 000 €
Etat	201 000 €
Usagers	- €
Gains environnementaux	- 3 000 €
Accidents mortels évités	- €

La mise en place du service de navette automatisée dans une situation d'expérimentation impacte cinq acteurs.

Le territoire de cœur de Brenne participe dans cette expérimentation à hauteur de 120 000€ pour la mise en place du service. On suppose une rémunération de l'opérateur à hauteur de 8 000€ par mois. Le bilan du territoire est donc négatif, car ce dernier ne possède aucune entrée d'argent (hors subvention) pour l'exploitation du service. En comparant avec la situation de référence, on constate que les coûts sont plus élevés pour le scénario expérimentation, avec une différence négative de plus de 415 000€. Cette différence s'explique par des coûts de mise en place sur le service plus importants, notamment pour permettre la circulation du véhicule automatisé dans de bonne condition (travaux d'infrastructure). Elle s'explique aussi par la participation financière auprès de l'exploitant du véhicule.

Le second acteur est l'exploitant du service de navette. Son bilan négatif de -1 290 000€, lié à l'investissement d'environ 230 000€ pour l'implantation du service de navette sur le territoire. A cela s'ajoutent les coûts d'exploitation du service estimés à environ 51 000€ TTC par mois. Le service étant gratuit, il n'y a pas de recette provenant de l'utilisateur. Cette perte de recette est compensée par le territoire, mais ne suffit pas à combler l'écart avec les coûts. Ces derniers sont plus importants que ceux observés sur le territoire de CASA à cause du système de location mensuelle du véhicule automatisée, qui ajoute des dépenses supplémentaires pour l'opérateur.

L'Etat est quant à lui impacté positivement par l'expérimentation, grâce aux recettes perçues via la TVA des différents coûts associés au projet comme l'investissement sur l'infrastructure routière et les coûts d'exploitation de l'opérateur. Les pertes de recettes dues au report modal restent très marginales. Le bilan de l'Etat est positif par rapport à la situation de référence, de plus de 201 000€. Cet écart est dû aux dépenses plus importantes liés aux services de navette automatisée.

Concernant les chauffeurs, ces derniers n'auront pas à effectuer le service de covoiturage et n'auront donc pas de coûts ou de recettes associés à ces déplacements. Cela représente un gain d'environ 5 000€ par rapport à la situation de référence.

L'utilisateur n'obtient aucun gain ou perte lié à l'usage du service sur le territoire. Tout comme à CASA, le bilan de l'utilisateur est négatif si nous ne prenons en compte que le coût du transport, le temps de parcours et la valeur du temps associée à ce dernier. Nous devons donc intégrer comme étant constants certains éléments non valorisables dans le calcul du surplus de l'utilisateur, comme l'attrait à l'utilisation d'un nouveau mode de transport, le confort de ne plus conduire pour les usagers les plus âgés, la disponibilité des autres modes de transport etc.

Concernant le bilan environnemental, ce dernier est négatif d'environ -3 200€ comparé à la mise en place du service de covoiturage. Ceci est lié au report journalier supposé sur le service de covoiturage plus important que dans le cas du scénario d'expérimentation de la navette.

Nous avons donc un bilan global plus négatif dans le cas du scénario expérimentation avec une VAN-SE négative de -1 502 000€ et une VAN négative de -1 499 000€. Cet écart important est justifié par des coûts de mise en place et d'exploitation plus importants pour la mise en place du service de navette que pour celui du covoiturage. De plus, les effets supposés pour le projet n'apportent pas de gains, que ce soit pour l'utilisateur dont le bilan reste nul, et pour l'environnement pour lequel le bilan est négatif. Nous allons donc réaliser de deux scénarios, reprenant le même cheminement que pour CASA, afin d'analyser l'impact de l'amélioration du service sur les différents acteurs observés.

5.2.3. Scénario probable

Dans le cas du scénario basé sur le comportement des usagers observés via la modélisation, nous avons supposé les hypothèses suivantes :

- Le service peut désormais aller jusqu'à une vitesse de 70km/h sur les routes départementales ;
- Nous avons supposé que cette multiplication de vitesse par 1,2 réduirait le temps de parcours de manière proportionnelle, nous avons donc un temps de parcours moyen avec la navette de 15 min pour la même distance que dans le scénario expérimentation ;
- La modélisation nous indique un report modal de la voiture vers l'usage de la navette plus important avec 25 usagers journaliers du service ;
- Un taux d'actualisation de 3,2% et une année de référence fixée à 2021.

L'opérateur voit son bilan se dégrader par rapport au scénario de l'expérimentation avec une diminution de -30 000€. Cette diminution s'explique par une hausse des performances de la navette, dont nous supposons que ces dernières ont un impact sur la consommation au kWh/km. On suppose une hausse de la consommation proportionnelle au gain de vitesse, ce qui vient augmenter les coûts d'exploitation pour le service, sans gain financier supplémentaire pour l'exploitant. Nous obtenons donc un bilan négatif à hauteur de -415 100€ pour le territoire par rapport à notre situation de référence.

L'Etat voit son bilan augmenter de 2 000€ par rapport au scénario expérimentation. Cette hausse est due à la perception de la TVA sur les coûts d'exploitation supplémentaires liés au passage de la navette à 70km/h. Les revenus diminuent à cause de la baisse de la taxe de carburant lié au report modal, mais cette dernière est moins importante que les gains supplémentaires de la TVA. Par rapport à la situation de référence, nous obtenons donc un gain pour l'Etat de 203 000€.

TABLEAU 19 : ANALYSE SOCIOECONOMIQUE DU SCENARIO PROBABLE A CŒUR DE BRENNE

Scénario Probable	
Résultats globaux	Scénario Probable
VAN-SE	- 1 509 000 €
VAN	- 1 529 000 €
Bilan par acteur	
Bilan projet pour AOT	- 415 000 €
Bilan projet pour l'opérateur STPA	- 1 322 000 €
Bilan projet pour les chauffeurs	5 000 €
Etat	203 000 €
Usagers	7 000 €
Gains environnementaux	8 000 €
Accidents mortels évités	5 000 €

Le bilan de l'utilisateur devient quant à lui positif grâce à l'amélioration du temps de parcours qui permet une hausse de son bilan de 7 000€. La constante fixée dans le scénario expérimentation pour obtenir un bilan nul pour l'utilisateur est également intégré dans les différents scénarios. Les effets supplémentaires supposés dans le cas de l'expérimentation sont donc conservés, ce qui permet d'obtenir un bilan positif par rapport à la situation de référence.

Le bilan environnemental augmente également par rapport au cas de l'expérimentation. Il devient positif grâce aux report modal supplémentaire obtenu à partir de la modélisation. Cela engendre de meilleurs effets environnementaux que dans le scénario d'expérimentation. Ce report modal permet d'obtenir un gain de 8 000€ par rapport à la situation de référence.

La hausse du report modal permet également de diminuer le nombre de véhicule kilomètre de la voiture observée sur le territoire. Ces derniers sont réduits de 1% par rapport à la situation de référence. On suppose donc une réduction de l'accidentalité proportionnelle, ce qui conduit à bilan d'accidentalité positif de 5000€ par rapport à la situation d'expérimentation et de référence.

L'évaluation socioéconomique du scénario Probable basé sur les comportements des usagers du territoire de CdB et de l'amélioration du service de navette améliore la plupart des bilans sauf celui de l'opérateur. On observe des effets positifs pour l'utilisateur, ainsi que pour le bilan environnemental.

Cependant, les gains obtenus avec l'amélioration du service ne compensent pas les pertes liées à la hausse des coûts d'exploitation pour l'opérateur du service. La VAN-SE du projet par rapport au cas de l'expérimentation diminue de 7 000€, avec une diminution de la VAN financière de 30 000€. Une hausse des performances du service avec ce niveau de demande ne permet pas rendre ce projet rentable d'un point de vue financier ou socioéconomique. La VAN et la VAN-SE du projet restent fortement négatives par rapport à la situation de référence avec un bilan global négatif de plus de 1 500 000€.

5.2.4. Scénario optimiste

Pour la réalisation de l'évaluation socioéconomique du scénario basé sur les intentions d'usage de la navette nous avons choisi de considérer les hypothèses suivantes :

- Nous conservons les mêmes hypothèses de performances du service de la navette que celles utilisées dans le cas du scénario Probable ;
- Nous observons une hausse du report modal vers la navette avec 78 usagers journaliers pour un service équivalent aux précédents scénarios ;
- Un taux d'actualisation de 3,2% et une année de référence fixée à 2021

TABLEAU 20 : ANALYSE SOCIOECONOMIQUE DU SCENARIO OPTIMISTE A CŒUR DE BRENNE

Scénario Optimiste	
Résultats	Scénario optimiste
Valeur actuelle nette du projet	- 1 492 000 €
VAN	- 1 531 000 €
Bilan par acteur	
Bilan projet pour AOT	- 415 000 €
Bilan projet pour l'opérateur STPA	- 1 322 000 €
Bilan projet pour les chauffeurs	5 000 €
Etat	201 000 €
Usagers	7 000 €
Gains environnementaux	21 000 €
Accidents mortels évités	11 000 €

Dans ce scénario optimiste, basé sur les intentions des enquêtés, les bilans financier et socioéconomique sont également négatifs par rapport à la situation de référence. Le bilan de l'Etat est positif (201 000€) et relativement similaire à celui en situation d'expérimentation. Le léger écart est lié au report modal vers le service de navette, ce qui entraîne une baisse des recettes perçues par la taxe sur le carburant qui n'est plus suffisamment compensé par les gains issus de la TVA.

Le bilan de l'utilisateur s'améliore de 7 000€ par rapport au scénario expérimentation et de référence, ce qui nous donne des résultats identiques à ceux du scénario probable. La différence de report modal entre ces deux scénarios n'est donc pas suffisante pour observer un gain notable pour l'utilisateur.

Le bilan environnemental s'améliore également par rapport au scénario expérimentation et le scénario probable, pour la même raison que le bilan de l'utilisateur. Ce dernier augmente de 21 000€ par rapport au scénario de référence

La réalisation de ce scénario suppose une réduction du nombre de véhicule kilomètre de 11 % impactant le nombre d'accidents de manière proportionnelle. Nous obtenons donc une hausse des gains liés aux accidents évités de 11 000€ par rapport à la situation de référence et d'expérimentation, et de 6 000€ par rapport au scénario probable.

Une demande plus importante pour le service, et des performances améliorées, impactent positivement le bilan socioéconomique. Les externalités produites par la hausse de demande du service permettent de compenser les pertes liées à la hausse des coûts d'exploitation et au manque à gagner de l'Etat sur les recettes perçues sur la taxe carburant. Cependant, cela ne permet pas d'obtenir une VAN et une VAN-SE positive par rapport à la situation de référence.

La VAN financière s'est dégradée par rapport à la situation d'expérimentation pour atteindre une valeur de -1 531 000€ par rapport à la situation de référence. La VAN-SE quant à elle augmente, mais reste négative à hauteur de - 1 492 000€. Les résultats négatifs obtenus sont fortement liés au coût important pour mettre en place le service sur le territoire. Nous allons donc chercher un montant de subvention nécessaire permettant de couvrir ces coûts financiers afin de s'intéresser aux gains liés aux effets du projet.

TABLEAU 21 : SYNTHÈSE DU MONTANT DES SUBVENTIONS NÉCESSAIRES PAR LES POUVOIRS PUBLIQUES POUR LA RÉALISATION DU PROJET

Subventions nécessaires pour la réalisation du projet			
Résultats	Expérimentation	Probable	Optimiste
VAN-SE	- 3 000 €	20 000 €	39 000 €
VAN	- €	- €	- €
Subvention par acteur			
Montant de subvention total	1 499 000 €	1 529 000 €	1 531 000 €
ADEME	- 633 328 €	- 646 003 €	- 646 848 €
CDB	- 299 800 €	- 305 800 €	- 306 200 €
Autres acteurs publics	- 565 873 €	- 577 198 €	- 577 953 €
Externalités			
Usager	- €	7 000 €	7 000 €
Gains environnementaux	- 3 000 €	8 000 €	21 000 €
Accidents mortels évités	- €	5 000 €	11 000 €

Afin de déterminer les montants des subventions nécessaires, nous nous sommes appuyés sur les parts de financement issus des 6 mois et demi d'expérimentation sur le territoire. Le montant des subventions des acteurs peut être équivalent à la valeur de la production de connaissance que ces derniers attribuent à l'expérimentation sur le territoire de Cœur de Brenne.

L'ADEME est le financeur principal du projet, avec un montant de subvention compris entre 633 000€ et 647 000€ selon les différents scénarios envisagés. Les informations obtenues récemment via le territoire nous ont permis d'identifier d'autres acteurs publics. Les contrats régionaux de solidarité territoriale (CRST), sont propres à la région du Centre -Val de Loire, et le syndicat départemental d'énergie de l'Indre (SDEI 36) est en charge de la distribution d'énergie sur le territoire.

D'autres financeurs comme le Crédit agricole et ENEDIS, ou l'Etat subventionnent le projet. L'ensemble de ces acteurs participe à environ 37,75% du montant de subvention total. Enfin, le territoire participe également avec un financement compris entre 300 000€ et 306 000€ selon les scénarios.

L'objectif des subventions est de combler le manque financier à gagner par le projet. Il s'agit ici des dépenses réalisées par l'opérateur et le territoire afin de mettre en place et exploiter le service de navette automatisée. Dans le scénario de l'expérimentation, la VAN socioéconomique reste négative malgré les subventions apportées par les différents acteurs. Les effets négatifs dégagés par le projet au niveau environnemental et l'absence de gain pour les usagers du service impactent le bilan. Le projet n'est donc pas rentable malgré l'apport des subventions. Cela étant, si le gain en connaissance produite par l'expérimentation est jugé supérieur au coût, alors le projet peut être justifié. Pour les deux autres scénarios, Probable et Optimiste, l'introduction des subventions permet d'avoir un bilan socioéconomique positif par rapport à la situation de référence.

6. CONCLUSION ET DISCUSSIONS

Si plusieurs expérimentations de navettes autonomes ont été menées dans le monde, peu ont fait l'objet d'évaluation socioéconomique et environnementale (Bouzouina et al., 2021). La difficulté de mise en place d'un dispositif méthodologique adapté et son alimentation en données sur l'évolution de l'offre et de la demande de mobilité constituent l'une des principales raisons (Bouzouina et al., 2023). Les expérimentations dans les deux territoires de la Communauté d'Agglomération de Sophia Antipolis et de la Communauté de Communes de Cœur de Brenne ont été l'occasion de mettre la performance du service de navette autonome à l'épreuve de l'usage et de la balance des avantages et des inconvénients socioéconomiques et environnementaux.

Au-delà de l'évaluation de l'expérimentation, deux scénarios prenant en compte les évolutions des usages et les performances du service ont été testés. Le premier, jugé probable, est construit à partir de la modélisation de la demande et le second, plus optimiste, repose sur les seules déclarations des enquêtés à utiliser la navette lors de l'enquête de mobilité. A chaque fois, les résultats sont comparés à ceux d'une situation de référence, qui n'est pas la situation actuelle mais celle qui prévaudrait si le projet n'est pas réalisé, permettant d'établir différents bilans. Plusieurs enseignements liés à ce premier travail d'évaluation socioéconomique et environnementale sont à mettre en avant.

Les bilans socioéconomiques et environnementaux des expérimentations et des scénarios sont mitigés. D'une part, le déploiement du service de navette autonome ne produit pas d'effets environnementaux significatifs. L'analyse environnementale conduit à des résultats semblables sur les deux terrains d'expérimentation. On constate que, malgré deux terrains d'expérimentations très différents, les résultats environnementaux sont similaires pour les scénarios d'expérimentation et probable. La situation d'expérimentation engendre elle des impacts légèrement supérieurs. Pour autant, on ne constate pas de gains environnementaux de l'implantation d'un système de navette autonome. Deux tendances apparaissent à l'examen des scénarios les plus optimistes sur le plan environnemental. A CASA, des gains environnementaux apparaissent, bien qu'ils soient très mineurs et non significatifs, même en cas de forte utilisation de la navette. Les gains envisagés à Cœur de Brenne sont eux davantage significatifs, d'autant plus que l'évolution du taux de remplissage de la navette est moins importante qu'à CASA.

D'autre part, les résultats de l'analyse socioéconomique concluent que les services mis en place pour ces expérimentations ne sont pas rentables. Les performances du service de navette pendant la période d'expérimentation sont encore insuffisantes et induisent un report modal faible. Pour autant, nous avons identifié que l'augmentation de la vitesse de la navette et de la fréquence du service permettent d'accroître l'utilisation de la navette par les usagers des territoires. Cela étant, ces améliorations de la performance du service ne suffisent pas pour inverser la tendance et parvenir à un bilan à l'équilibre. Les coûts de mise en place et d'exploitation du service représentent aujourd'hui une forte contrainte vis-à-vis de sa rentabilité socioéconomique. Une réduction importante de ces postes, indispensable pour viser cette rentabilité, passera par l'étape de commercialisation à plus grande échelle des véhicules qui sont au stade du prototype aujourd'hui.

Les résultats d'évaluation socioéconomique et environnementale dépendent de la configuration du cas d'usage et sont difficilement généralisables. Les résultats présentés dans ce rapport ne doivent pas être dissociés des hypothèses formulées. Ces dernières sont nombreuses et engendrent parfois des incertitudes car elles sont propres à chaque territoire d'expérimentation. Si l'amélioration du service dans différents scénarios permet des gains sur le plan des externalités, notamment pour les usagers et l'environnement, les effets diffèrent selon le territoire et le type de desserte proposée.

A CASA, la vitesse du véhicule étant identique à celle de la voiture, le temps d'attente de la navette ne permet pas d'obtenir des gains de temps et un report modal significatif. De plus, l'essentiel du report modal se fait à partir de la marche à pieds. Ainsi, la mise en place du service du dernier kilomètre lors de l'expérimentation ne permet pas de révéler des dynamiques de report en faveur des modes alternatifs à la voiture et des effets systémiques sur la mobilité dans le territoire de CASA. A Cœur de Brenne, le service déployé sur une plus longue distance vise directement le report modal depuis la voiture. Il est également susceptible d'attirer de nouveaux usagers qui ne réalisaient pas le déplacement avant la mise en service de la navette. C'est d'ailleurs le cas des 13% des personnes ayant expérimentés la navette dans ce territoire. Cela peut être compté parmi les avantages du désenclavement du territoire. Malgré les limites inhérentes à la comparaison entre les deux terrains d'expérimentation, les résultats sur Cœur de Brenne sont de ce point de vue plus encourageants.

A travers les différents bilans, ce premier travail participe à la production de la connaissance sur la performance du nouveau service de navette autonome. L'expérimentation est la condition permissive pour cette production de connaissance. C'est un avantage important à mettre dans la balance de l'évaluation socioéconomique de l'expérimentation du service de navette autonome, mais il est difficilement quantifiable. Un des moyens permettant de l'intégrer est de prendre en compte les montant de la subvention publique dans l'analyse coût avantages, ce qui permet ainsi de justifier le projet. L'évaluation de l'expérimentation permet de questionner la cohérence des objectifs associés au cas d'usage et la pertinence des moyens mis en place. Par exemple, un autre tracé peut s'avérer plus pertinent par rapport la visée « usage » de l'expérimentation. Elle permet également d'identifier des impensés, telle que la problématique de recharge de batterie pendant le service, et des verrous scientifiques, comme la définition du modèle économique associé à l'exploitation du service de navette autonome. La présence ou l'absence de contact humain, via l'opérateur à bord, et la relation entre constructeur et exploitant est une question importante pour ce nouveau modèle économique (Stephen et al., 2023). Le retour des enquêtés sur l'absence de l'opérateur à bord est plutôt défavorable et perçu par certains comme étant une « déshumanisation du service ». Cela étant, le service de navette autonome présente des promesses qu'il faudrait continuer à mettre à l'épreuve de l'observation de la performance servicielle et environnementale, afin de distinguer parmi les connaissances produites ce qui relève de l'universel de ce qui est spécifique à chaque cas d'usage.

Au-delà des résultats qui s'efforcent de quantifier les effets, l'analyse a permis de tester la sensibilité de certains facteurs dans la perspective d'améliorer les bilans socioéconomiques et environnementaux. Sur le plan environnemental, les analyses de sensibilité a mis en lumière un point de vigilance concernant le système technique et notamment la supervision. Ce seul paramètre est à même de beaucoup faire évoluer le bilan environnemental des expérimentations. Sur le plan socioéconomique, le poids associé au coût d'achat du véhicule et d'exploitation du service par rapport à l'évolution de la demande a déjà été mis en avant. La demande, élément clé dans tout projet de transport, est étroitement associée à l'acceptation du service dans le cadre de l'expérimentation de la navette autonome. Les résultats de modélisation et des scénarios probables montrent les limites de la seule amélioration du service, telle que l'augmentation de la vitesse, sur l'augmentation de la demande et du bilan socioéconomique, notamment sur le territoire de CASA. Hormis la portée du périmètre de chaque cas d'usage, la demande est également influencée par d'autres facteurs non pris en compte dans la modélisation notamment ceux liés à l'appréhension de l'autonomisation de la navette (Lécureux et al., 2022).

Ce premier travail contribue également à la construction d'un cadre méthodologique permettant de mettre en place une évaluation socioéconomique et environnementale commune de ce nouveau service. Cet exercice a permis de poser les bases de cette évaluation, à travers la combinaison de l'Analyse en Cycle de Vie et l'Analyse Coût Avantage. A notre connaissance, c'est la première fois que les deux analyses soient menées de manières conjointes, avec les mêmes périmètres, hypothèses/scénarios et des interactions en termes d'entrées et de sorties (voir partie 2.3).

Les entrées de l'ACV reposent sur les données d'enquête et les sorties de modélisation de la demande menées dans l'analyse socioéconomique, et l'ACA est alimentée à son tour par le bilan environnemental issu de l'ACV. Cette démarche interdisciplinaire a nécessité un travail de construction d'une nomenclature commune, avec plusieurs allers-retours permettant d'appréhender la multitude des échelles spatiotemporelles (du composant électronique au territoire, et du changement de comportement immédiat au changement climatique de long termes) et des données d'entrées à articuler.

Néanmoins, ce cadre méthodologique présente des limites. La combinaison de l'ACV et l'ACA est une piste intéressante pour améliorer la prise en compte des aspects environnementaux dans le bilan socioéconomique, mais peu d'indicateurs environnementaux sont monétarisables. Seuls les émissions de CO₂ et certains polluants locaux ont pu être intégrés. D'autres polluants atmosphériques telles que les particules fines (PM 2.5 et PM 10), liées à l'usage de la navette, n'ont pas pu être pris en compte faute de monétarisation. De manière générale, plusieurs effets liés à l'usage de la navette autonome sont difficilement quantifiables tel que celui du désenclavement associé au territoire de Cœur de Brenne ou celui de la valorisation de la production de la connaissance associée à l'expérimentation. S'ajoute à cela la difficulté de dissocier les effets propres à l'automatisation et ceux liés à l'électrification, notamment sur le volet environnemental. D'autres limites relatives à la disponibilité des données de l'offre, tel que l'évolution du coût du service et la maturation de la technologie, ou au contexte du recueil des données de la demande sont bien mises en avant dans le livrable de synthèse sur la collecte de données nécessaires à l'analyse socioéconomique et environnementale des expérimentations (Bouzouina et al., 2023).

Enfin, au-delà des résultats montrant des bilans socioéconomiques et environnementaux mitigés sur les deux territoires, la production de la connaissance est un facteur primordial pour saisir les enjeux et les verrous scientifiques et opérationnels associés à la mise en service des navettes autonomes. Ainsi, elle justifie pleinement le recours à des expérimentations successives dans le cadre d'un processus apprenant d'identification et de quantification des effets. Un service de navette autonome a ses propres spécificités qui interrogent non seulement l'acceptation par les usagers, mais aussi le modèle économique d'exploitation. Outre la double composante matérielle et digitale de l'infrastructure, commune à d'autres nouveaux services de mobilité, celui de la navette autonome se distingue par son autonomisation. Il se distingue aussi par une configuration inédite des acteurs et des liens financiers/organisationnels, et plus particulièrement par la position du constructeur et sa relation avec l'exploitant. Dans ce contexte inédit, le cumul de la connaissance et le gain de maturité tirés des différents cas d'usage sont indispensables pour pouvoir se projeter de l'évaluation de l'expérimentation *stricto sensu* vers l'évaluation d'un service à plus grande échelle.

7. BIBLIOGRAPHIE

Bouzouina L., Buisson L., Klein O., Nicolas J-P., Zoubir A., Dauvergne M., Buronfosse M., Deep A., Gaude A., Maltête D., Pioli R. (2021). Evaluation socioéconomique et environnementale : cadre méthodologique, *Livrable 1.2.1 du projet Expérimentation de Navettes Autonomes*. 86 p.

Bouzouina L., Dauvergne M., Kotelnikova-Weiler N., Klein O., Djeridi R., Blaustein D., Soury M., Lécureux B., Morhain C. (2023). Synthèse sur la collecte de données nécessaires à l'analyse socioéconomique et environnementale des expérimentations, *Livrable 5.3.1 du projet Expérimentation de Navettes Autonomes*. 131 p.

Kotelnikova-Weiler N., Feraille Fresnet A., (2022). "Analyse de cycle de vie des systèmes techniques de la mobilité automatisée", Rapport Technique, Laboratoire Ville Mobilité Transport, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel. 2022. (hal-03827916v2)

Lécureux, B., Bonnet, A., Manout, O., Berrada, J., & Bouzouina, L. (2022). Acceptance of Shared Autonomous Vehicles: A Literature Review of stated choice experiments. <https://hal.science/hal-03814947>

McFadden D. (1974). "The measurement of urban travel demand." *Journal of public economics*, 3, 303–328.

Stephan P., Henry P., Bouzouina L., Morhain C. (2023). Enquête terrain sur les Changements des Métiers de l'Exploitation TC, *Livrable 4.6.2 du projet Expérimentation de Navettes Autonomes*. 48 p.

ANNEXE A :

Territoire	CASA	Cœur de Brenne
Effets positifs de la mise en place du service	<p>Offre un surplus non identifiable pour les anciens usagers de la marche à pied</p> <p>Réduction des coûts d'exploitation pour l'opérateur si passage en supervision à distance</p> <p>Service gratuit</p>	<p>Offre un surplus non identifiable pour les anciens usagers de la voiture (délégation de conduite, confort, contact social avec les autres usagers...)</p> <p>Nouvelle solution de mobilité pour les non-usagers de la voiture -> gain de mobilité</p> <p>Cohabitation avec les autres usagers de la route (voiture)</p> <p>Faire parler du territoire</p> <p>Service gratuit</p>
Effets négatifs de la mise en place du service	<p>Aucun gain de temps lié à l'utilisation de la navette en cas d'attente de cette dernière</p> <p>Très faible demande pour le service -> véhicule qui circule souvent à vide -> coût d'exploitation inutile, usure du véhicule, dégradation de l'environnement</p> <p>Aucun report de la voiture vers la navette</p> <p>Report de la MAP -> navette -> dégradation du bilan environnemental</p> <p>Cohabitation avec les autres usagers difficile (voiture et vélo)</p> <p>Consommation de données pour l'autonomie</p> <p>Absence de sécurité dans le véhicule</p> <p>Perte du contact avec l'opérateur</p> <p>Forte dépendance auprès du constructeur du véhicule</p>	<p>Aucun gain de temps observé en cas d'usage du service</p> <p>Fréquence de passage trop limité qui réduit l'usage du service pour des activités de courte durée</p> <p>Location du véhicule désavantageuse pour l'opérateur en cas d'exploitation longue du service</p> <p>Très faible demande pour le service -> véhicule qui circule souvent à vide -> coût d'exploitation inutile, usure du véhicule, dégradation de l'environnement</p> <p>Consommation de données pour l'autonomie</p> <p>Absence de sécurité dans le véhicule</p>



Tentez l'expérience