



PLAN ET METHODOLOGIE D'EVALUATION

LOT 5

10/06/2024

Livable L003

Historique des versions :

Versi on	Date	Description, mises à jour	Statut
0.1	26/01/2024	Première version	D
0.2	03/04/2024	Mise à jour	D
0.3	01/05/2024	Mise à jour – T 1.4	D
0.4	22/05/2024	Mise à jour – T 5.4	D
0.5	06/06/2024	Mise à jour – lot 5.2	D
0.7	06/06/2024	Mise à jour – lot 5.4	D
0.8	07/06/2024	Mise à jour – lot 5.1	D
1	10/06/2024	Finalisation du rapport	

Auteurs :

Nour-Eddin El Faouzi, Thierry Bellet, Christine Buisson, Nicolas Coulombel, Angelo Furno, Pierre-Antoine Laharotte, Ludovic Leclercq, Aurelie Banet, Fayçal Touzout, Silvia F. Varotto.

Avertissement :

Les informations fournies dans ce document le sont « telles quelles », sans aucune garantie quant à leur adéquation pour un usage spécifique. Les membres du consortium ne seront pas tenus responsables de dommages de toute nature, incluant, sans limitation, les dommages directs, spéciaux, indirects ou consécutifs qui pourraient découler de l'utilisation de ces informations, sauf pour les responsabilités qui ne peuvent être exclues en vertu de la loi applicable. Bien que les efforts aient été coordonnés, les résultats ne reflètent pas nécessairement les opinions de tous les membres du consortium MOB-AUTO².

© 2024 Consortium MOB-AUTO²

TABLE DES MATIERES

1	Contexte	5
1.1	Positionnement et état de l'art.....	5
1.2	Plan et démarche d'évaluation.....	6
2	Évaluation a priori via simulation phytale	9
2.1	Objectif.....	9
2.2	Description du Processus	9
2.3	Modélisation	12
2.4	Données d'Entrée et Sorties de l'Évaluation	12
2.5	Principales contributions	13
2.6	Points de vigilance	13
3	Évaluation des impacts sur le trafic et ses externalités	14
3.1	Objectif.....	14
3.2	Description du Processus	15
3.3	Données d'Entrée et Sorties de l'Évaluation	17
3.4	Points de vigilance	18
4	Évaluation de l'acceptation et acceptabilité	19
4.1	Objectif.....	19
4.2	Description du Processus	19
4.3	Modélisation de l'acceptabilité et de l'acceptation	21
4.4	Méthodologie déployée pour la collecte de données et l'évaluation de l'acceptabilité/acceptation	22
4.4.1	Données collectées pour l'enquête « d'acceptabilité sociétale » de l'offre de transport automatisé ..	22
4.4.2	Données collectées pour l'enquête d'acceptabilité/d'acceptation auprès d'une cohorte d'utilisateurs ..	24
4.4.3	Données collectées pour l'enquête de « satisfaction d'usage »	25
5	Évaluation socio-économique.....	26
5.1	Objectif.....	26
5.2	Description du processus.....	26
5.3	Modélisation et enquête	27
5.4	Données d'entrée et sorties de l'évaluation	28
6	Dimensionnement optimal du service.....	29
6.1	Objectif.....	29
6.2	Description du processus.....	29
6.3	Modélisation	30
6.4	Données d'entrée et sorties de l'évaluation	31
7	Contributions au bien commun	32
8	Références	33

1 Contexte

Ce livrable vise à synthétiser l'ensemble des méthodologies développées dans les lots 1 et 5 du projet MOB-AUTO², ainsi que certaines données acquises lors des expérimentations. Ces méthodologies, intégrées aux biens communs du projet, sont conçues pour assister les utilisateurs envisageant de déployer des services ou des expérimentations impliquant des véhicules autonomes. Elles permettent de définir précisément les tâches nécessaires, les besoins spécifiques à chaque tâche, et les interrelations entre elles.

1.1 Positionnement et état de l'art

Plusieurs méthodologies d'évaluation ont été précédemment élaborées pour les systèmes d'aide à la conduite et l'automatisation de la conduite. La méthodologie FESTA est la plus connue, développée pour réaliser des tests opérationnels sur le terrain (FOT) pour les systèmes avancés d'assistance à la conduite (ADAS) et d'autres technologies de communication pour les véhicules. Cette méthodologie a été utilisée avec succès dans des FOT de grande envergure, au sein de projets européens et nationaux. Le manuel FESTA, mis à jour plusieurs fois¹, demeure une ressource précieuse pour la mise en place et la réalisation des évaluations des FOT.

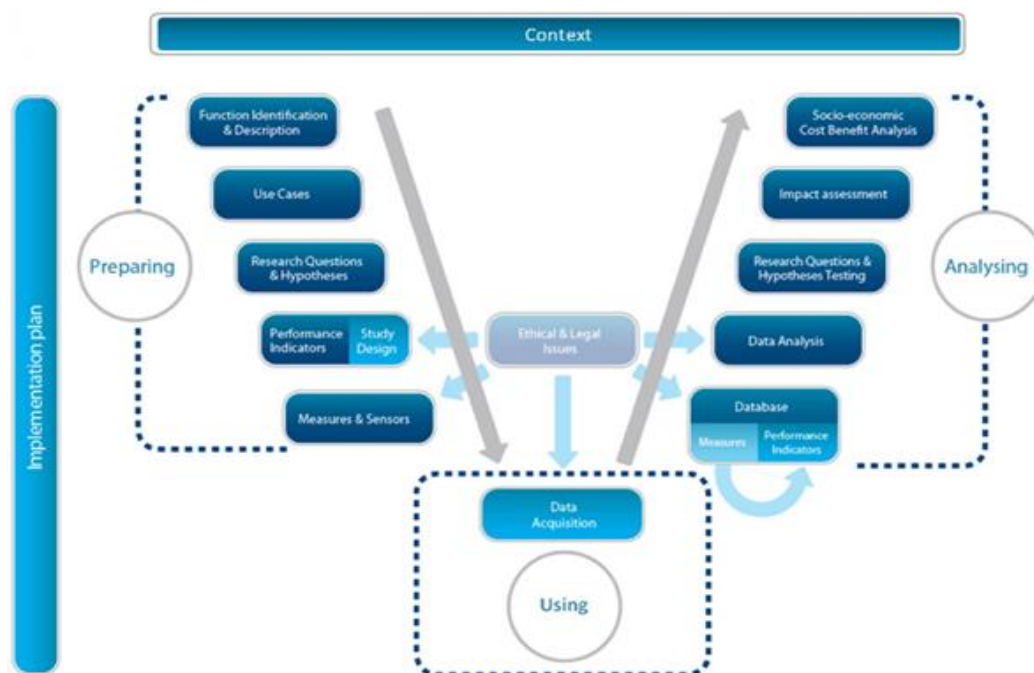


Figure 1 : Présentation synthétique des étapes d'évaluation d'un projet opérationnel
(Source : [FOT-Net 2021])

Avec la CCAM, une nouvelle approche était nécessaire, surtout lorsque la faible maturité technologique ne permettait pas de soutenir de tels tests. Il a été reconnu que FESTA présente des lacunes avec des limites de recherche spécifiques concernant la CCAM. Les attentes envers la CCAM sont élevées, incluant des impacts sociétaux significatifs, mais des préoccupations subsistent quant à son utilisation. Il est donc crucial d'évaluer ses impacts même si un FOT ne peut pas encore être réalisé.

Il existe des cadres méthodologiques conçus spécifiquement pour la CCAM. Le sous-groupe trilatéral d'évaluation des impacts pour l'automatisation des transports routiers a entrepris le premier effort pour harmoniser les études

¹ La dernière version étant la version 8 en 2017. FESTA (2021). *FESTA Handbook*, Version 8.

d'évaluation des impacts à l'échelle mondiale (cf. Innamaa, S., et al., 2018). Cependant, ce cadre de haut niveau ne couvre pas toutes les étapes de l'évaluation.

De nombreux efforts ont été entrepris dans certains projets européens du programme-cadre Horizon 2020 pour adapter la méthodologie FESTA aux pilotes de conduite automatisée à grande échelle (cf. Innamaa, S., et al., 2020). Toutefois, ces méthodologies étaient conçues sur mesure pour des projets spécifiques et ne sont pas universellement applicables.

En se basant sur de nombreuses bonnes pratiques issues de projets précédents, à savoir ARCADE, CARTRE, VRA, FOT-Net et FESTA, la méthodologie européenne commune d'évaluation (EU-CEM) pour la mobilité automatisée, connectée et coopérative (CCAM) a vu le jour. Cette méthodologie, développée dans le cadre du projet FAME, est facilement généralisable et offre des recommandations pour rendre les résultats des évaluations plus comparables et fournir un vocabulaire commun (Frame, 2024).

La méthodologie proposée pour l'évaluation du service automatisé MOB-AUTO², est inspirée de la méthodologie FESTA, en l'adaptant au cas d'usage de navette automatisée sur autoroute. Elle repose également sur les acquis et bonnes pratiques acquises dans les projets ENA et SAM. Elle est de facto conforme à la méthodologie EU-CEM pour la mobilité automatisée, connectée et coopérative (CCAM).

Ici, nous nous concentrons uniquement sur les tests sur route, qui sont l'essence même de l'expérimentation MOB-AUTO², avec de vrais usagers, ciblant un pilote de service. En effet, plusieurs initiatives et projets CCAM traitent des technologies de faible TRL, le projet MOB-AUTO² se distingue par un TR élevé avec une navette évoluant jusqu'à 90 km/h sur autoroute entre les villes de Dourdan (ou Longvilliers) et Massy, ce qui constituerait une première mondiale en devenant le socle de développement d'une nouvelle offre de mobilité automatisée et partagée.

1.2 Plan et démarche d'évaluation

L'élaboration du plan d'évaluation est un processus itératif. La figure 2 ci-dessous illustre ces étapes et ses itérations.

Sur la base d'un tel plan d'évaluation, les étapes clés de l'évaluation d'un projet de déploiement d'une navette sont donc les suivantes :

1. **Phase de préparation :**
 - L'identification de la fonction à tester et sa définition ;
 - La définition des cas d'usage ;
 - La définition des questions de recherche et des hypothèses ;
 - Le choix des indicateurs de performance et la définition de la méthode expérimentale ;
 - La définition de la méthode de mesure et des dispositifs d'enquêtes nécessaires.
2. **Phase d'utilisation**
 - Acquisition des données ;
3. **Phase d'analyse :**
 - Sur la base des données stockées et des variables, construction des indicateurs ;
 - Analyse de données ;
 - Réponses à la question de recherche et test des hypothèses ;
 - Évaluation des impacts ;
 - Analyse socio-économique.

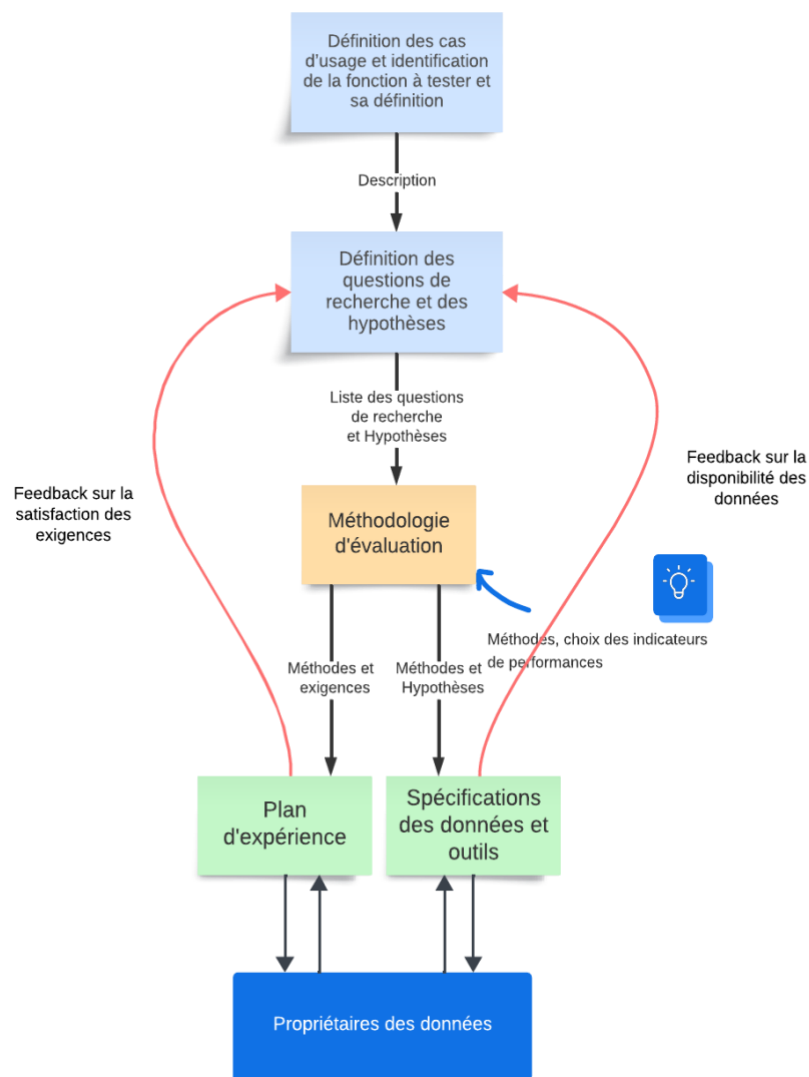


Figure 2 : Étapes et itérations dans l'élaboration du plan d'évaluation
(adapté de : [Fame, 2024])

Le projet MOB-AUTO² a développé plusieurs méthodologies, dont voici une présentation succincte ainsi que les indications sur leur moment d'application approprié :

- Méthodes d'évaluation des effets sur le trafic et la sécurité,
- Méthodes de mesure d'acceptation et d'acceptabilité,
- Méthodes de mesure de l'impact socio-économique et environnemental,
- Méthodes de dimensionnement optimal du service, tant en termes d'offre que de stratégie d'incitation pour encourager le transfert modal vers ce type de transport vertueux.

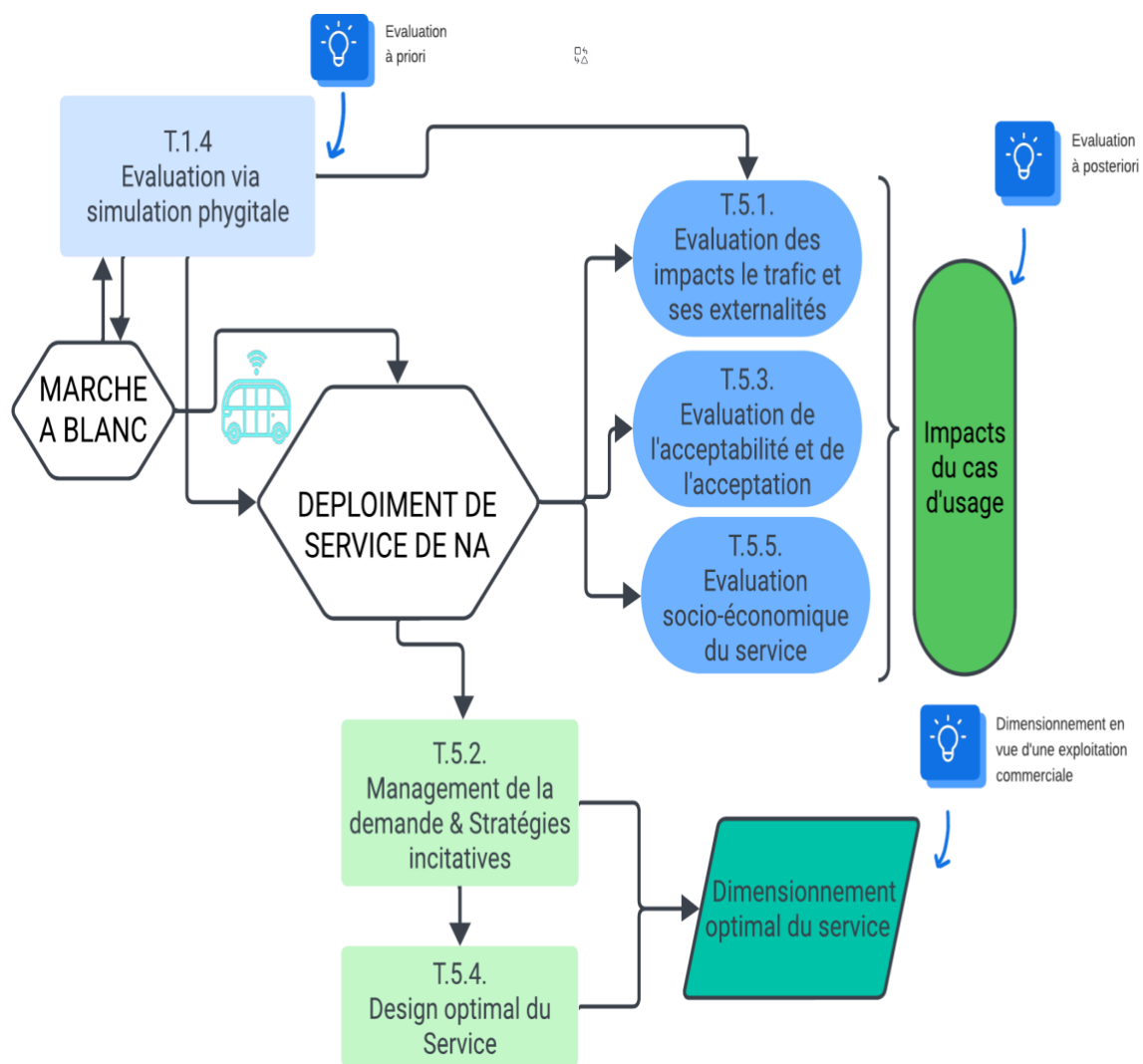


Figure 3 : Démarche d'évaluation du projet MOB-AUTO²

2 Évaluation a priori via simulation phytale

2.1 Objectif

L'objectif est de produire une évaluation a priori des performances de la navette automatisée vis-à-vis d'indicateurs de sécurité routière. L'évaluation consiste à analyser en environnement contrôlé (i.e. Simulation) des scénarios de conduite jugés critiques ou à enjeu pour la navette testée au regard d'indicateurs de sécurité, tels que le temps inter-véhiculaire, le Time-to-Collision (TTC), le Post-Encroachment-Time (PET) ou encore le profil d'ac-/dé-célération. L'évolution de ces indicateurs en fonction des situations rencontrées et vis-à-vis de seuils critiques usuels seront considérés pour déterminer a priori le niveau de sécurité de la navette vis-à-vis de son environnement immédiat.

2.2 Description du Processus

Visant une évaluation a priori, la démarche prend intégralement place en environnement contrôlé et s'appuie sur une reproduction du comportement de la navette automatisée dans diverses situations.

La Figure 2 donne un aperçu de l'architecture logicielle et des outils de simulation requis pour implémenter un environnement contrôlé, puis faire évoluer une navette automatisée fictive au sein de cet environnement. L'architecture distingue l'environnement réel (en vert), les données d'entrées requises et collectées dans l'environnement réel (en violet) et l'ensemble de l'environnement simulé servant à la mise en œuvre des expérimentations (en bleu).

Au sein de l'environnement simulé, une distinction est opérée entre :

- (i) la modélisation du comportement de la navette automatisée en réaction à son environnement, tel que perçu (brique « EGO's model ») et
- (ii) la modélisation de l'environnement en 3D avec lequel la navette automatisée interagit (brique « Environnement Simulation »).

Les deux briques interagissent via la brique « Interface » (en jaune) assurant l'échange d'information entre les deux briques.

La brique "Environnement Simulation" regroupe l'ensemble des composantes permettant de concevoir un environnement contrôlé pour la navette. Elle se compose de :

- un générateur d'environnement en 3D et un émulateur de capteurs pour observer/requêter cet environnement, alimentés par une maquette numérique en 3D. Divers outils existent dans la littérature, dont SiVIC et CARLA. Ces outils sont en mesure de produire l'ensemble de l'environnement statique de la navette, ainsi que la partie déterministe de l'environnement dynamique, i.e. des obstacles (individus, objets, etc) suivant une trajectoire prédéterminée.
- un simulateur de trafic définissant la dynamique des véhicules, dits "obstacles", car évoluant et interagissant avec la navette. Ces "obstacles" dynamiques ne suivent pas des trajectoires prédéterminées (contrairement aux "obstacles" déterministes), mais adaptent leurs trajectoires à leur environnement suivant des lois comportementales (car-following / lane-changing). La dynamique des obstacles est contrôlée par des simulateurs tels que SymuVia, SUMO, etc.

La brique "EGO's model" regroupe l'ensemble des composantes permettant à la navette d'interpréter son environnement, puis de planifier une trajectoire et prendre des décisions. Cette brique prend en entrée les caractéristiques de la navette et de son environnement telles que mesurées et fournit en sortie des instructions de contrôle des pédales de frein/accélération et du volant.

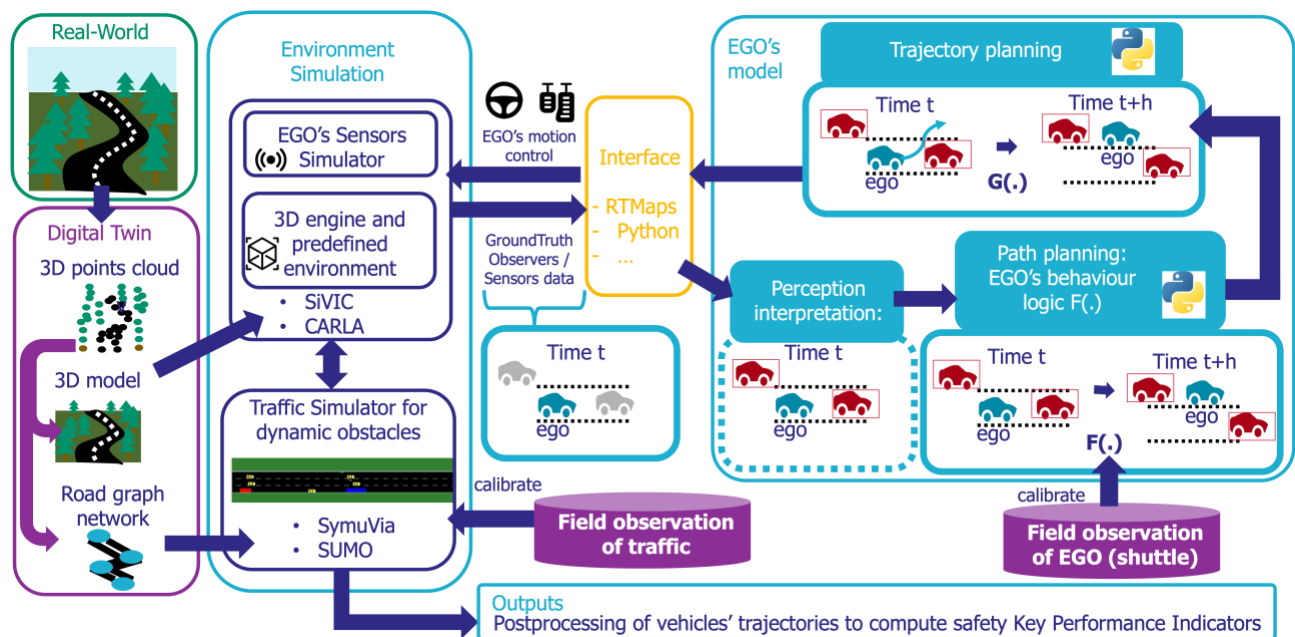


Figure 4 : Aperçu de l'architecture logicielle requise pour mener une évaluation a priori des performances de la navette vis-à-vis de la sécurité routière

Le processus d'évaluation a priori mis en œuvre se découpe dès lors en 5 phases :

– Phase de conception de l'environnement contrôlé (brique « Digital Twin »)

Cette phase vise à construire un environnement permettant de faire évoluer la navette dans un flux de trafic réaliste. L'objectif est de produire un ou plusieurs environnements (terrains de jeu) d'intérêt pour l'évaluation de la navette. Un environnement est composé de :

- un descriptif de l'offre consistant en un ou plusieurs fichiers décrivant le réseau routier et exportable sous divers formats en vue d'une exploitation par les différents outils de simulation sollicités. Le format OpenDrive est désormais le format le plus standard convertible et exportable vers divers logiciels. Dans le cadre d'une simulation phygitale, le réseau routier doit être décrit sous deux formes
 - Un réseau routier (format XML dédié) décrit comme un graphe connexe, composé de tubes juxtaposés et connectés entre eux, en vue d'alimenter les outils de simulation du trafic ;
 - Une maquette numérique (format OBJ et/ou format dédié) décrivant sous forme de polygones numériques l'ensemble
- un descriptif de la demande de trafic prenant la forme de matrices origine-destination ;

La simulation phygitale étant gourmande en ressources, seules des portions de route limitées (de l'ordre de 1 à 3 km) peuvent être proposées comme environnement. La reproduction de quelques zones jugées particulièrement critiques est privilégiée.

Trois zones d'intérêt sont identifiées sur le trajet de desserte de la navette :

- Zone "P+R de Longvilliers" : Cette zone regroupe l'insertion sur l'autoroute A10 (respectivement la sortie, suivant le sens de circulation) et la gestion de la traversée de ronds-points permettant d'accéder au P+R de Longvilliers.
- Zone "Desserte d'arrêt" : Cette zone se compose de la portion d'autoroute A10 comprenant un arrêt desservi par la navette.
- Zone "Gare de Massy" : Cette zone se compose d'une portion de l'A10, l'entrée/sortie de l'autoroute, puis l'intégralité du trajet jusqu'à la gare de Massy.

Les zones d'intérêt feront donc l'objet d'une campagne de prises de mesure sur le terrain (par des géomètres souvent), ce qui aboutira à la production d'un nuage de points en 3D. Ce nuage de point alimentera alors (i) la production d'un modèle numérique en 3D par un infographiste et (ii) la réalisation d'un fichier descriptif du réseau routier dans un format standard, tel que OpenDrive.

– Phase de modélisation du comportement de la navette automatisée (brique « EGO's model »)

Cette phase vise à développer un modèle apte à mimer le comportement de la navette, i.e. à générer le contenu de la fonction $F(.)$ dans la Figure 2. Un tel modèle prend en entrée : à l'instant t , la position et vitesse instantanée de la navette, i.e. véhicule EGO, ainsi que les positions et vitesses instantanées de l'ensemble des obstacles composés d'obstacles dynamiques, tels que le trafic environnant, et/ou stationnaires, tels que la signalisation de travaux. En sortie, un tel modèle fournit la nouvelle position de la navette à l'instant $t+h$, i.e. la trajectoire court-terme de la navette. Diverses approches sont envisageables pour aboutir à un tel modèle suivant le contexte :

- Modèle de type « boîte noire » : dans le cas où l'organe de Perception-Décision-Action de la navette est disponible et librement accessible, ce dernier peut être exploité comme une boîte noire et sollicité afin de déterminer la véritable réponse de la navette. Le modèle se compose alors du véritable logiciel de la navette et s'apparente à une approche de type « Software-in-the-Loop ». La principale difficulté réside dans l'extraction de ce logiciel du système « navette », puis de la création d'une interface adaptée pour assurer son interaction avec les stimuli issus de l'environnement.
- Modèle de type statistique : dans le cas où une grande quantité d'observations de trajectoires de la navette et de son environnement immédiat sont disponibles, un modèle statistique peut-être appris afin de créer un lien entre la configuration actuelle de la navette (i.e. sa position et vitesse instantanée, ainsi que celles des obstacles dans son environnement immédiat) et sa position future. De tels modèles [Zhang, 2019] ont été mise en œuvre dans le cas de descriptions longitudinales de la configuration en apprenant les positions adoptées par la navette suivant l'axe longitudinal le long du tronçon routier.
- Modèle basé sur des lois comportementales : dans le cas où une quantité limitée d'observations de trajectoires de la navette et des véhicules environnants sont disponibles, des règles comportementales peuvent être établies en s'appuyant sur des modèles existants, tels que les lois de car-following ou des heuristiques dédiées, etc [Bellet, 2018]. Ces derniers sont alors calibrés à partir des observations effectuées sur le terrain.

À l'exception de la première approche nécessitant de disposer directement du logiciel embarqué dans la navette, les approches alternatives présentent l'avantage de ne s'appuyer que sur des observations de la navette dans diverses situations. La phase de « marche à blanc » de la navette constitue dès lors une bonne opportunité de collecte des données nécessaires à la génération d'un modèle comportemental pour la navette.

– Phase de calibration de l'environnement contrôlé (brique « Environnement Simulation »)

Cette phase consiste à calibrer l'environnement contrôlé pour qu'il soit en mesure de reproduire des situations similaires à celles observées sur le terrain. Cette phase de calibration concerne essentiellement la simulation dynamique du trafic et est alimenté par les données de trafic (demande (matrices O/D / volumes) et niveau de service (vitesses/remontées de congestion)) disponibles et observées sur un jour typique dans l'environnement réel. Des procédés usuels de calibration seront mis en place en fonction des données disponibles.

– Phase de scénarisation (brique « Environnement Simulation »)

Cette phase vise à concevoir, puis implémenter les scénarios de test appliqués en vue de stresser la navette dans les environnements contrôlés définis au préalable. Ces scénarios se composent, entres autres, des paramètres suivants :

- Profils de demande globaux par Origine-Destination (ou niveau de charge du réseau routier) ;
- Part de Poids-Lourds dans le flux global ;
- Implémentation de réduction temporaire de l'offre (ex : travaux, etc).

– Phase de post-traitement et d'évaluation (brique « Outputs »)

Cette phase vise à procéder à l'évaluation de performance de la navette vis-à-vis d'indicateurs de sécurité routière. S'appuyant sur la réalisation en environnement contrôlé des tests préalablement scénarisés, les sorties des outils de simulation sont collectées, traitées, puis analysées en vue de produire des indicateurs de performance. Divers indicateurs de sécurité pourront être analysés : le Temps Inter-Véhiculaire (TIV), le Time-to-Collision (TTC), le Post-Encroachment -Time (PET), la distribution d'accélération/décélération.

Cette phase se compose donc d'une étape de développement des routines de post-traitement des trajectoires de véhicules générées au cours des simulations en vue de produire des indicateurs de performances permettant de qualifier le comportement de la navette, puis d'une étape d'analyse et de comparaison des performances entre scénarios.

Les analyses menées pourront compléter celles effectuées à partir des données collectées directement sur le terrain dans le cadre de la tâche 5.1 (évaluation a posteriori). En effet, au cours de l'évaluation a posteriori, seuls les scénarios effectivement rencontrés pourront être analysés, tandis que l'évaluation a priori permet d'analyse

des scénarios non observés ou difficilement observable sur le terrain. Afin de mesurer l'écart potentiel entre les sorties de l'évaluation a priori et a posteriori, les performances en termes de sécurité routière seront, dans la mesure du possible, comparées sur un scénario similaire et servant de témoin.

2.3 Modélisation

La modélisation nécessite de reproduire la dynamique de deux objets distincts :

- Une navette automatisée, dite véhicule EGO, captant son environnement et interagissant avec les « obstacles » de l'environnement, composés des véhicules du flux de trafic et des obstacles stationnaires. L'organe de décision de la navette est dépeint par un modèle spécifique, tel que décrit en phase 2 du processus, et est alimenté par un organe de perception. L'organe de perception fournit les positions des obstacles tels que captés en interrogeant / requêtant l'environnement virtuel généré par un outil de simulation microscopique du trafic (ex : SymuVia, SUMO) et/ou un outil de simulation en 3D de l'environnement (ex : SiVIC / CARLA).
- Un flux de trafic composé de véhicules « obstacles » et généré à partir d'un outil de simulation microscopique du trafic (ex : SymuVia, SUMO).

Différentes plateformes de simulation existent dans la littérature en vue de simuler diverses composantes : le trafic (ex : SUMO, SymuVia, etc), un environnement en 3D composé d'éléments dynamiques et statiques (ex : SiVIC, CARLA), les capteurs embarqués sur un véhicule (ex : SiVIC), le réseau de télécommunication (ex : NS3, ARTERY, OMNET++, etc). Avec l'émergence des véhicules connectés et/ou Automatisés, ont vu le jour des environnements de co-simulation permettant l'interopérabilité entre certains simulateurs. La plateforme EPICAM en fait partie et opère l'interopérabilité et l'échange de flux de données entre les outils SymuVia (simulateur microscopique de trafic) et SiVIC (Simulateur Véhicule Infrastructure Capteurs). Une telle plateforme constitue donc un outil permettant d'immerger une navette (véhicule EGO) dans un flux dynamique de trafic, puis d'assurer leur interaction en intégrant les effets réciproques, ce qui rend possible l'évaluation des interactions entre navette et flux de trafic.

2.4 Données d'Entrée et Sorties de l'Évaluation

Les données d'entrées requises sont les suivantes :

– Descriptif des environnements de test

- Descriptif du réseau routier (format OpenDrive recommandé), contenant les informations géométriques détaillées sur le nombre de voies, la largeur des voies, les courbures, le type de marquage au sol, etc..., mais également la position des boucles électromagnétiques et les vitesses limites.
- Maquette numérique en 3D décrivant le réseau routier et son environnement immédiat (bas-côté, etc)
- Informations relatives à la prise de décision de la navette et permettant de déterminer la réponse de la navette aux sollicitations :
- Données de position (lon, lat) et vitesse de la navette avec une fréquence de 10 Hz [requis] ;
- Données relatives à l'angle de braquage de la navette (Heading Angle) [requis]
- Statut de conduite de la navette (« self-driving mode » vs « remote control ») [requis] ;
- Position longitudinale et latérale de la navette sur les voies (i.e. x = abscisse curviligne le long du tronçon de route et y = numéro de voie) avec une fréquence de 10 Hz [si disponible] ;
- Distance à la ligne latérale de marquage à droite [si disponible] : l'objectif est d'identifier les changements de voie et de caractériser le comportement de la navette vis-à-vis des marquages au sol (lane-keeping behaviour) ;
- Décisions prise par la navette (fréquence de 10 Hz) : Vitesse ciblée par la navette (Target-Speed) & temps/distance intervéhiculaire ciblé (targeted time headway) ;
- Données de position (et vitesse instantanée) des obstacles perçus par la navette (i.e. dans son rayon de perception) en amont et en aval avec une fréquence de 10 Hz (Ces données peuvent être exprimées dans un référentiel centré sur la navette) [si disponible] ;
 - o Position (lon, lat) en absolu ou (x, y) dans le repère de la navette [requis] ;
 - o Vitesse instantanée de l'obstacle [si disponible] ;
 - o Voie de circulation de l'obstacle [si disponible]
 - o Type du véhicule obstacle [si disponible]
- Flux vidéo enregistrés par la navette [Pour validation de l'interprétation]

- Données issues de boucles électromagnétiques (ou capteurs équivalents) sur le parcours effectif de la navette et en amont (pour permettre l'estimation de la demande sur le réseau), ainsi que des informations relatives à la performance du réseau (ex : données de vitesses issues de traces GPS, remontée de queues de congestion, etc). Ces données visent à disposer des indicateurs suivants tout au long du réseau traversé par la navette :
 - Volume de trafic effectif (par voie et par pas de temps régulier sur un jour typique à reproduire) ;
 - Vitesse du flux (par pas de temps régulier sur un jour typique à reproduire) ;
 - Densité de trafic (par voie et par pas de temps régulier sur un jour typique à reproduire) [si disponible] ;
 - Matrice Origine-Destination (par pas de temps régulier sur un jour typique à reproduire) ou, par défaut, volume de trafic observé en amont sur une zone non congestionnée.
 - Données historiques d'accidentologie (taux d'accident, par exemple) par tronçon routier [si disponible] pour valider le choix des zones évaluées et valider les tendances observées sur les indicateurs de sécurité routière observés en simulation.

Les sorties attendues sont les suivantes :

- Par scénario considéré, analyse des indicateurs de sécurité routière mesurés dans l'environnement immédiat de la navette automatisée (véhicule EGO).

2.5 Principales contributions

La tâche 1.4 vise à mettre en œuvre une évaluation a priori des performances de la navette autonome sur des scénarios et/ou zones du parcours jugées critiques. L'originalité de la démarche réside dans les outils sollicités permettant de co-simuler : les capteurs embarqués sur la navette, le comportement de la navette, son environnement en 3D statique comme dynamique (à travers l'usage d'un simulateur de trafic). Une telle démarche étant originale, une nouvelle méthodologie doit être mise en œuvre et documentée. Contribueront notamment à l'établissement de cette méthodologies les composants suivants :

- L'identification et l'explicitation des données requises en entrée de ladite méthodologie ;
- Le procédé de modélisation du comportement de la navette automatisée adopté en fonction des circonstances rencontrées ;
- Le procédé de calibrage (ou d'apprentissage) du modèle de comportement de la navette automatisée en fonction des données disponibles et des organes de décision implémentés permettant de caractériser la navette ;
- L'ensemble d'indicateurs de performance considérés lors de l'évaluation de la navette ;
- La démarche adoptée pour la conception du procédé expérimental ;
- L'architecture globale du procédé de co-simulation implémenté, présenté comme un exemple d'implémentation.

2.6 Points de vigilance

Le principal risque lié à cette évaluation a priori du service MOB-AUTO² est lié à la connaissance anticipée du système technique de la navette automatisée (organe de perception et informations relatives à la prise de décision de la navette permettant de déterminer la réponse de la navette aux sollicitations). Cette connaissance du système technique risque d'être partielle pour des raisons de confidentialité du constructeur de la navette (ici MILLA).

Comme illustré en Figure 2, la méthodologie proposée s'appuie sur des recueils de données effectués sur le terrain et visant à caractériser aussi bien le terrain de jeu que la navette. La disponibilité de l'ensemble de ces données conditionne la mise en œuvre de la méthodologie telle que décrite. En cas d'écart, des hypothèses seront formulées et implémentées.

3 Évaluation des impacts sur le trafic et ses externalités

3.1 Objectif

L'objectif de la tâche 5.1 est d'analyser a posteriori les impacts avant et après l'introduction d'un service de navette automatisé sur le trafic et ses externalités. Cette analyse se concentrera sur les indicateurs de fluidité du trafic, de sécurité routière et de consommation énergétique, en utilisant des données réelles et des outils de calculs pour évaluer ces impacts.

Nous indiquons en ***gras italiques*** les étapes qui concernent notre tâche et qui seront détaillées dans ce rapport. Les étapes concernant l'analyse (partie montante du cycle en V de la Figure 1), qui feront l'objet du livrable final de la tâche 5.1, sont indiquées en *italiques*.

Phase de préparation :

- L'identification de la fonction à tester et sa définition ;
- La définition des cas d'usage ;
- ***La définition des questions de recherche et des hypothèses :***
- ***Le choix des indicateurs de performance et la définition de la méthode expérimentale ;***
- ***La définition de la méthode de mesure et les capteurs nécessaires.***

Phase d'utilisation

- Acquisition des données ;

Phase d'analyse :

- *Sur la base des données stockées et des variables, construction des indicateurs ;*
- *Analyse de données ;*
- *Réponses à la question de recherche et test des hypothèses ;*
- *Évaluation de l'impact ;*
- Analyse socio-économique.

La figure suivante présente le déroulement de la tâche 5.1, qui sera la principale contributrice aux travaux d'évaluation de l'impact sur le trafic et ses externalités. La phase de préparation, qui consistait à sélectionner les indicateurs qui seront utilisés par la suite fait l'objet de cette partie. Par rapport au déroulement général prévu, la dernière phase de cette tâche, d'analyse critique, est couplée avec la fin de la phase d'expérimentation, ce qui nécessitera de réaliser les analyses de données dès que celles-ci seront disponibles, en flux tendu.

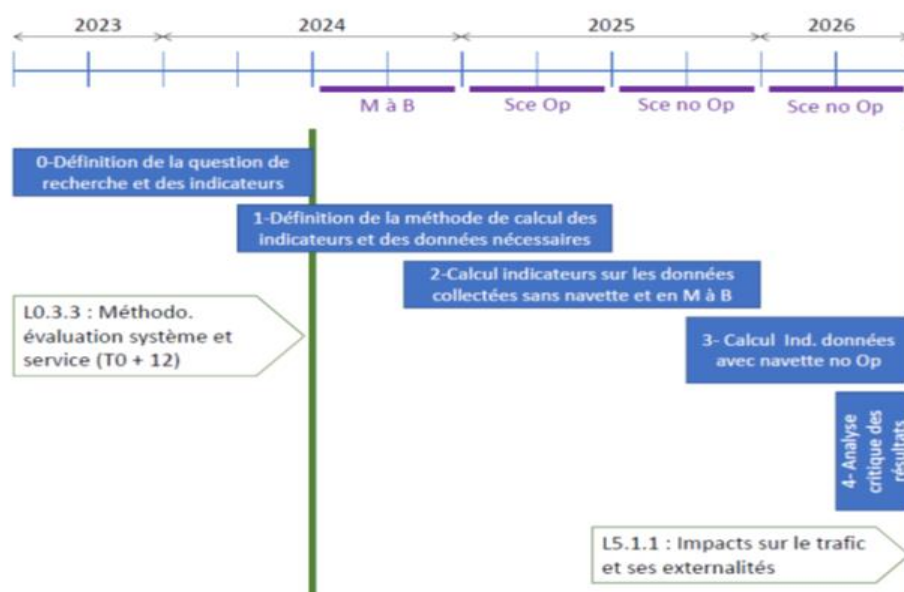


Figure 5 : Calendrier des cinq phases de la tâche 5.1.

À partir de juillet 2024 commence l'expérimentation en marche à blanc (M à B), puis début 2025 aura lieu l'ouverture du service avec un opérateur à bord (OP), suivi de deux phases sans opérateur (NO-OP), l'une fin 2025 avec un panel d'usagers, l'autre avec ouverture au public.

3.2 Description du Processus

Cette première année de la tâche 5.1 qui correspond à la phase de préparation de l'expérimentation nous a conduit à réaliser trois des actions identifiées dans la méthode Festa :

- Définition des questions de recherche et des hypothèses :
- Choix des indicateurs de performance et la définition de la méthode expérimentale ;
- Définition de la méthode de mesure et les capteurs nécessaires.

Les deux premières tâches seront décrites dans cette partie, la troisième dans la partie suivante.

Définition des questions de recherche et des hypothèses

Soit N le nombre de personnes transportées par jour par la navette dans chaque sens. Notre question de recherche est double et peut s'exprimer de la façon suivante :

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Par rapport au déplacement de N personnes entre le parc multimodal de Longvilliers et la gare de Massy (et dans l'autre sens) utilisant N voitures, l'utilisation de la navette pendant l'expérimentation en mode sans opérateur permet-elle ou non des gains en matière de sécurité routière, de congestion et de pollution ?• Cette quantification de l'impact est-elle suffisante en termes de validation statistique pour nous permettre de conclure sur l'effet global de cette navette sur le trafic et ses externalités (sécurité routière, congestion, pollution) ? |
|--|

Choix des indicateurs de performance et définition de la méthode expérimentale

Les *indicateurs de performance* sont choisis, pour ce qui concerne la congestion et la pollution, dans la continuité des pratiques antérieures du laboratoire. Pour la sécurité routière, nous utilisons des références de la littérature (voir [Fu et al. 2021] et [Kusano et al, 2011] par exemple). Nous allons en détailler la nature et la méthode de calcul dans la suite du rapport.

En ce qui concerne le choix de *la méthode expérimentale*, nous avons retenu, lors de nos réflexions conduites depuis le début de la tâche 5.1, une méthode d'évaluation basée principalement sur des données, même si les résultats de cette tâche devront naturellement être mis en regard des résultats obtenus en simulation dans les autres tâches, notamment par la simulation phytale, qui donnera des résultats intéressants sur l'intégration de navette conduite par un algorithme au sein du trafic.

Les données de trafic et de contexte (météo, mains courantes) seront utilisées dans un premier temps pour construire un **référentiel trafic** qui décrira la demande (débits des entrées et des sorties, ce qui permettra d'estimer la demande et l'offre, pourcentage de poids lourds) et les conditions de trafic. Dans ce référentiel, plusieurs types de demande (forte / moyenne / faible) seront caractérisées ainsi que plusieurs contextes pour chaque type, décrits par la météo et les données d'exploitation (présence d'incident par exemple). Nous avons choisi de n'utiliser que les données pour caractériser ces jours, sans recourir à la simulation. En effet, l'impact attendu de la présence ou non de la navette est faible, puisque le nombre de véhicules utilisant, dans le sens province Paris, l'autoroute entre Longvilliers et Massy est de plusieurs milliers par heure en heure de pointe et que la réduction de la demande induite par le remplacement de N véhicules par une navette effectuant plusieurs voyages n'aura qu'un impact très limité. Mener une étude en simulation dans ces conditions est lourd pour un résultat final probablement assez peu significatif. Ces informations de débit et de vitesse (ainsi que de taux d'occupation et de pourcentage de poids lourds) seront très utiles pour suivre le contexte et quantifier les impacts sur la congestion et la pollution.

Pour quantifier les **impacts sur la congestion**, nous conduirons des analyses de données sur chacun des jours du référentiel trafic identifié. Ces analyses porteront sur le débit entrant (dont nous verrons si nous pouvons l'assimiler à une demande grâce aux données de vitesses) et de débit de sortie sur les deux principales sorties de l'autoroute (ce qui nous donnera une estimation de l'offre de la section autoroutière). Sur cette base, avec la méthode des débits cumulés [Buisson et al, 2010], nous obtiendrons pour les situations sans automatisation de la navette et avec navette automatisée (avec ou sans la supervision de l'opérateur), des estimations fiables des temps totaux passés et des temps totaux perdus en congestion. Une analyse statistique sur la signification de cette comparaison sera bien sûr conduite.

Pour quantifier les **impacts sur la pollution**, nous utiliserons le référentiel trafic pour alimenter un outil reconnu de calcul d'émission (COPERT) [Emisia, 2024]. Nous utiliserons également les informations sur la consommation énergétique de la batterie de la navette avec et sans automatisation. Les trajectoires pourront être injectées dans le module PHEM et une comparaison des résultats en simulation et des données sera réalisée. Là encore, une analyse de significativité statistique sera conduite.

Pour les **impacts sur la sécurité routière**, le fait que la navette soit déployée en conditions réelles et qu'une collecte de données très fine soit réalisée à bord de la navette nous permet de calculer de manière directe les indicateurs recommandés par la littérature. Si les modèles utilisés par la tâche 4.1 sont intéressants, notamment dans une phase a priori, disposer de ce type de données nous ouvre des possibilités nouvelles dans le cadre d'une évaluation a posteriori. Avoir recours à une simulation nous obligerait à comprendre comment les inévitables erreurs commises par les outils de simulation modifient les résultats. C'est les données de la marche à blanc qui constitueront pour cette évaluation de sécurité routière les données « sans » et les données avec automatisation (avec ou sans opérateur à bord) seront les données « avec ».

Les indicateurs de sécurité routière que nous avons retenus sont les suivants :

- Temps avant collision (*Time To Collision, TTC*). Ce temps est calculé à chaque pas de temps (un dixième de seconde, typiquement) et décrit la dangerosité des comportements des usagers, s'ils conservaient leur vitesse actuelle jusqu'à la collision. Si le temps qui sépare l'instant actuel de la future collision, est inférieur au temps de réaction, il y a bien sûr un danger avéré. Ceci est illustré par la figure suivante.
- Les deux indicateurs associés au TTC (tel que le TET : Time Exposed TTC et TIT : Time Integrated TTC), qui mesurent le temps pendant lequel le TTC est inférieur à un seuil de temps de réaction seront étudiés également.
- L'index de collision potentielle avec décélération d'urgence (*Potentiel Index for Collision with Urgent Deceleration PICUD*) qui calcule la distance entre deux véhicules à l'arrêt si le suiveur réalisait un freinage d'urgence est également retenu.
- Nous calculerons enfin la décélération nécessaire pour éviter un crash (*deceleration rate to avoid a crash DRAC*) qui est un indicateur qui reflète comme te précédent la dangerosité d'une situation proche du crash.

Ces indicateurs seront calculés sur la base de données très précises (avec une fréquence de 10Hz) de position de la navette et du véhicule qui la suit et de celui qui la précède.

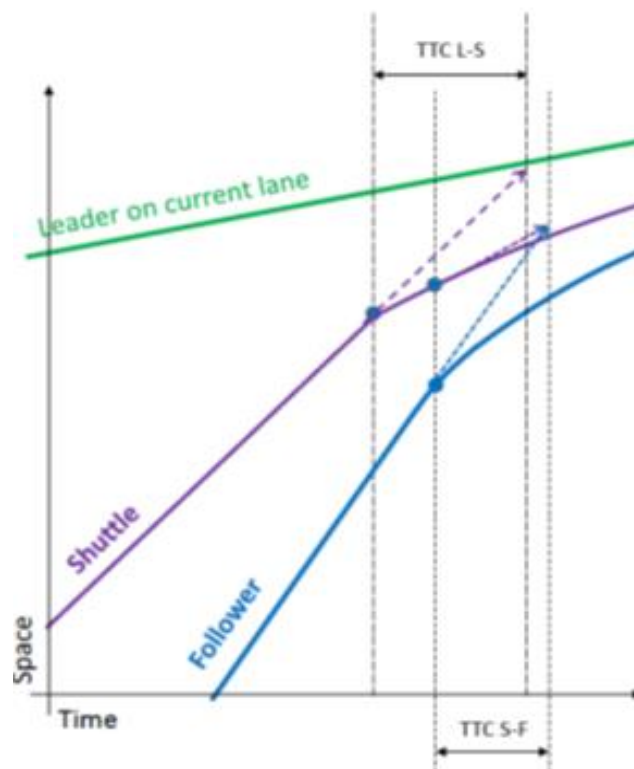


Figure 6 : illustration de la méthode de calcul du temps avant collision (TTC)

3.3 Données d'Entrée et Sorties de l'Évaluation

Le processus de traitement des données d'entrée nécessaires et les sorties attendues sont décrits sur la figure suivante, qui liste l'ensemble des données nécessaires.

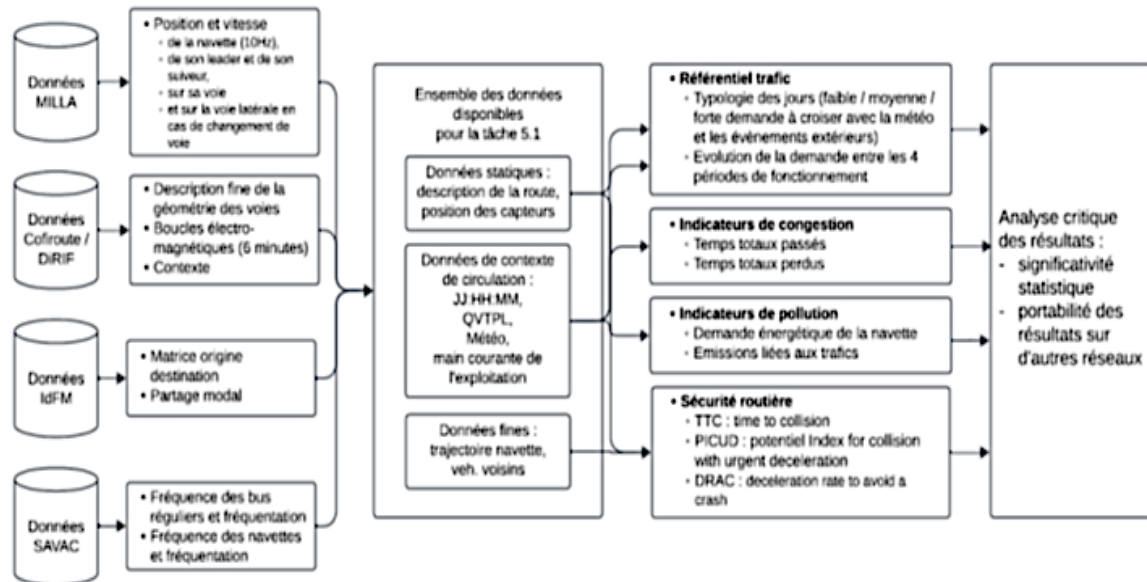


Figure 7 : Description du processus de traitement des données d'entrée.

Nous insistons sur la nécessité d'avoir accès aux données de position de la navette avec une grande fréquence (10Hz), éventuellement de vitesse. Cette position peut être stockée soit sous forme de coordonnées GPS soit en référence avec la route (à condition qu'une méthode de repérage commune au projet MOB-AUTO² soit définie et partagée). Mais, pour avoir la possibilité de calculer des indicateurs de sécurité routière il est indispensable de disposer d'information sur la position du véhicule précédent et du véhicule suiveur sur la même voie, et sur la voie latérale en cas de changement de voie.

Comme le montre la Figure 7, il est indispensable de pouvoir estimer la vitesse du véhicule précédent et du véhicule suiveur. Pour cela la distance entre les la navette et les deux véhicules qui l'entourent, si elle est mesurée de manière précise (radar, lidar par exemple) peut être une bonne source primaire de calcul de la position absolue du suiveur et du précédent, et, par suite de leurs vitesses.

La nécessité d'avoir des collectes systématiques des données MILLA pendant les 4 périodes de 6 mois de fonctionnement doit également être soulignée. En effet, chaque jour, nous attendons un nombre d'environ 10 rotations sur une longueur de 60 km. La navette ne fonctionnera qu'en jour de semaine.

Si on calcule le nombre de rotations réalisées il vaut :

$$60 \text{ km} \times 10 \text{ rotations par jour} \times 5 \text{ jours} \times 52 \text{ semaines} \times 2 \text{ années} = 312\,000 \text{ km.}$$

Compte tenu de la segmentation de l'itinéraire en zones spécifiques, de la segmentation des jours en fonction du contexte de trafic, de la nécessité d'avoir accès à de très nombreuses situations similaires avant /après pour pouvoir faire des comparaisons fiables, c'est un nombre tout juste suffisant.

En effet, l'analyse de sécurité routière sera conduite en spécifiant les différentes zones de l'itinéraire. La table suivante montre comment on définira ces zones et comment on pourra mettre en regard les informations sur les caractéristiques de la voie et l'impact sur la circulation de la navette.

Début de la section	Position GPS	Fin de la section	Position GPS	Longueur de la section [m]	Description précise de la section	Remarque
Parc multimodal de Longvilliers	48.56590, 1.98627	Fin du biseau de rabattement de Longvilliers	48.57244, 1.99783	1200	Sortie d'un parking, franchissement d'un carrefour giratoire (troisième sortie), conduite en file, franchissement d'un carrefour giratoire (première sortie), conduite en file, franchissement d'une barrière de péage, conduite en file, insertion dans un flux prioritaire (cedez-le-passage).	Dans cette section, de nombreuses manœuvres spécifiques devront être réalisées.

Figure 1 : Premier exemple de segmentation de l'itinéraire en section et de description de chaque section.

3.4 Points de vigilance

Il est capital que les données de position de la navette et des véhicules qui l'entourent soient collectées avec une fréquence de 10 Hz pendant toute la durée de l'expérimentation. Une évaluation de sécurité routière ne pourra être réalisée qu'à ce prix.

4 Évaluation de l'acceptation et acceptabilité

4.1 Objectif

Pour garantir – à terme - le succès d'une nouvelle offre de mobilité reposant sur les Navettes Autonomes (NA) MOB-AUTO², il convient de se préoccuper de leur acceptabilité au niveau individuel et collectif. Ces véhicules seront-ils jugés *a priori* comme un futur mode de transport sûr et attractif ? Existe-t-il des freins à l'acceptabilité, des peurs ou des inquiétudes chez leurs utilisateurs potentiels (ou chez certaines populations particulières d'utilisateurs) qu'il conviendrait de dissiper afin de faciliter le déploiement et l'usage futur de ce mode de transport ? Que se passera-t-il après la première expérience d'utilisation de ce nouveau type de véhicules ? Ces appréhensions seront-elles levées ou, au contraire, aggravées ? Enfin, dans quelle mesure les usagers des navettes seront-ils satisfaits de leur expérience(s) d'utilisation(s) et de l'offre de transport automatisé MOB-AUTO² ?

Dans ce contexte général, l'objectif de la Tâche 5.3 sera de réaliser un ensemble d'enquêtes permettant d'évaluer l'acceptabilité, l'acceptation puis la satisfaction des utilisateurs des navettes MOB-AUTO², à différents stades du processus de déploiement de cette nouvelle offre de mobilité.

4.2 Description du Processus

Lorsqu'on se préoccupe de la façon dont une nouvelle technologie sera « acceptée » ou non par de futurs utilisateurs (Figure 7), il convient en effet de distinguer deux niveaux différents : l'*acceptabilité* et l'*acceptation* (cf. Schade et Schlag, 2003 ; Schuitema, Steg, & Forward, 2010 ; Distler, Lallemand & Bellet, 2018; Bel, Coeugnet & Watteau, 2019).



Figure 8 : Le processus d'Acceptabilité, d'Acceptation et de Satisfaction d'Usage

L'acceptabilité est un jugement prospectif sur l'*intention d'usage* d'un produit, d'un service ou d'une technologie avant même de l'avoir utilisé(e). Il s'agit donc d'une évaluation *a priori* que réalise un futur utilisateur potentiel, à partir de la façon dont il se « représente » cette technologie ou ce futur service (Payre, Cestac & Delhomme, 2014 ; Bellet et Banet, 2021). Cette dimension est centrale lorsqu'il s'agit de travailler sur des technologies inexistantes ou « en devenir » (comme des concepts de systèmes), ou encore inaccessibles (ce qui est le cas aujourd'hui des navettes autonomes MOB-AUTO²).

L'acceptation renvoie pour sa part à la mesure de l'intention d'usage après une ou plusieurs utilisations effectives de ce service ou de cette technologie. Il s'agit donc d'une évaluation *a posteriori*, qui s'étaye sur de l'expérience vécue, même minimale. Plus les usages auront été nombreux et plus les interactions avec la nouvelle technologie auront été ancrées dans l'activité naturelle de l'utilisateur, plus les jugements d'acceptation seront soutenus par l'expérience, et plus les mesures d'acceptation qui en seront faites seront susceptibles de prédire des intentions d'usages effectives. Néanmoins, il convient ici de souligner le statut particulier qu'occupe la première expérience d'utilisation, notamment dans le contexte spécifique des véhicules automatisés (Bellet, Rayon et Banet ; 2023). Si celle-ci s'avère négative, cela peut alors déboucher sur un rejet définitif de la technologie, surtout si l'utilisateur dispose de moyens de transport alternatifs.

Enfin, au-delà des enjeux d'acceptabilité et d'acceptation, se pose aussi la question de la **Satisfaction** des utilisateurs après l'utilisation du service de mobilité automatisée MOB-AUTO². C'est ce niveau de satisfaction qui conditionnera directement l'*appropriation* de ce nouveau mode de transport par ses usagers, c'est-à-dire son intégration effective dans les pratiques de mobilité de chacun.

Dans le cadre du projet MOB-AUTO², ces différentes phases du processus de déploiement d'une nouvelle offre de mobilité reposant sur les navettes automatisées seront investiguées. Synthétiquement, le processus d'analyse et d'évaluation de l'acceptabilité/acceptation sera structuré en deux phases principales :

1. **Phase de pré-déploiement** : Avant l'introduction des navettes MOB-AUTO², une **enquête d'acceptabilité sociétale** sera tout d'abord menée (en ligne) auprès d'un **échantillon représentatif de la population française** de 2500 personnes. Cette enquête devra permettre d'identifier les *intentions d'usage* de ce nouveau mode de transport automatisé, mais aussi d'identifier des verrous et/ou des résistances potentielles, que cela concerne l'ensemble de la population ou seulement certaines catégories particulières d'utilisateurs (en fonction de leurs caractéristiques sociodémographiques, du mode de transport qu'ils utilisent actuellement de façon privilégiée, ou de leurs attitudes envers les nouvelles technologies en général, et les véhicules automatisés en particulier). En parallèle de cette enquête nationale, il s'agira également de constituer une **cohorte d'utilisateurs MOB-AUTO²** (composée de 50 à 60 personnes) avant que ceux-ci n'aient eu la possibilité d'utiliser les navettes, afin de collecter leurs jugements *d'acceptabilité a priori* envers ce nouveau mode de transport, ce qui permettra ensuite de s'intéresser à l'évolution temporelle de ces jugements au fur et à mesure des usages qu'ils feront de ce service.
2. **Phase de post-déploiement** : Une fois que le service de navettes MOB-AUTO² sera réellement opérationnel, les participants intégrés dans cette **cohorte** devront répondre à une **enquête d'acceptation après usage** afin de collecter leurs avis après l'utilisation de ce mode de transport automatisé. Cette enquête d'acceptation se déroulera immédiatement après la réalisation du trajet en navettes (via une application accessible sur smartphone ou via des enquêteurs). En pratique, les membres de la cohorte seront invités à répondre à cette enquête à **deux reprises** : après leur première utilisation des navettes, afin de mesurer comment ce *premier usage* aura impacté (ou non) leurs jugements d'acceptabilité a priori, et après plusieurs utilisations (3 trajets réalisés, a minima) afin d'évaluer les évolutions de leurs jugements après un *usage répétés* du service MOB-AUTO².

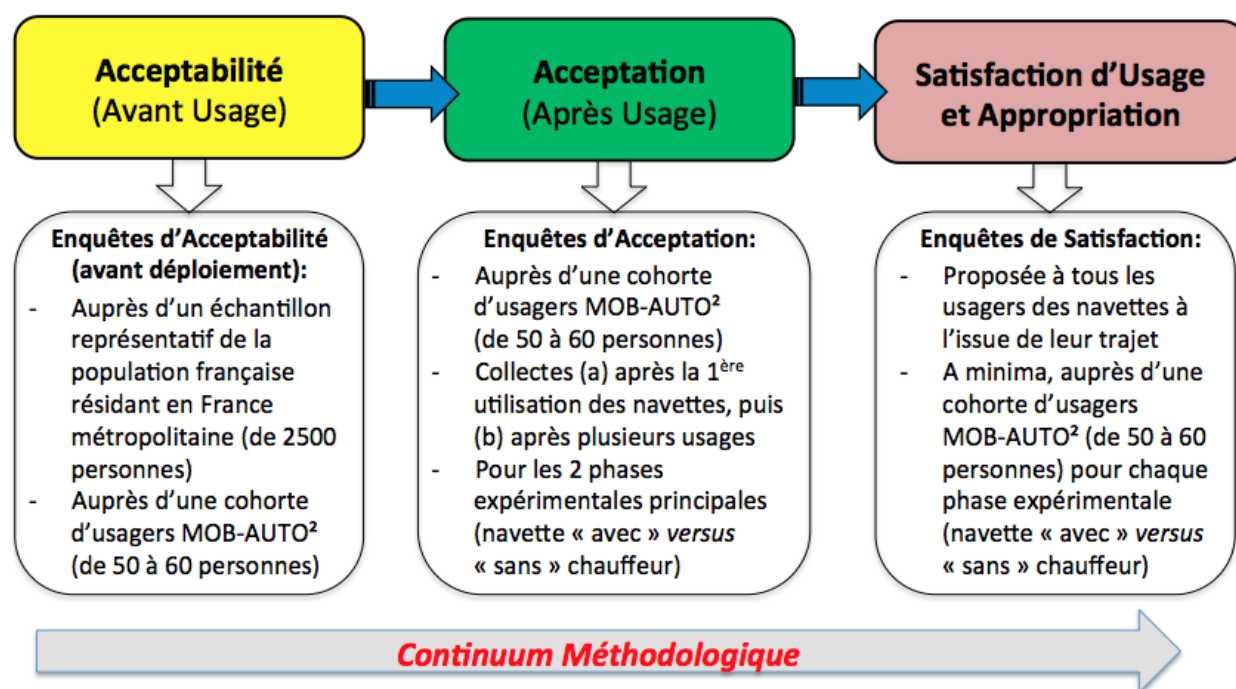


Figure 9 : Continuum méthodologique pour l'étude de l'Acceptabilité/Acceptation des navettes automatisées MOB-AUTO², tout au long du processus de déploiement

Par ailleurs, toujours en phase de post-déploiement, des enquêtes de **Satisfaction d'usage** seront également réalisées auprès des membres de la **cohorte**, d'un côté (en complément de l'enquête d'acceptation), mais aussi auprès de **tous les utilisateurs** des navettes qui accepteront d'y répondre. Il s'agira ici de collecter un *retour d'expérience vécue* en termes de « *satisfaction d'usage* » auprès des utilisateurs immédiatement à l'issue de leur trajet en navette. Dans cette perspective, cette enquête se devra d'être très synthétique et susceptible d'être auto-administrée par l'utilisateur lui-même, en utilisant l'application MOB-AUTO² développée par MILLA.

Enfin, ce processus général de collecte sera implémenté à deux « moments-clés » du projet MOB-AUTO² : une première fois auprès des passagers empruntant les Navettes MOB-AUTO² lorsqu'il y aura un chauffeur à bord (phase 1), et une seconde fois lorsque que celui-ci ne s'y trouvera plus, et que le contrôle sera réalisé exclusivement à distance (phase 2).

4.3 Modélisation de l'acceptabilité et de l'acceptation

Sur la base des modèles théoriques existants dans la littérature en matière d'acceptabilité/d'acceptation des nouvelles technologies (comme le modèle TAM [*Technology Acceptance Model*] de Davis [1989], l'UTAUT [*Unified Theory of Acceptance and Use of Technology*] de Venkatesh et al, 2003 ; 2008 ou le CTAM [*Car Technology Acceptance Model*] d'Osswald et al, 2012) et des manques constatés au niveau de ces modèles (concernant notamment le *niveau de satisfaction* envers les solutions technologiques actuellement utilisées par chacun), un nouveau modèle spécifiquement dédié l'analyse de l'acceptabilité des navettes autonomes a été élaboré puis validé dans le cadre du projet ENA-AURA (« *Expérimentation Navettes Autonomes* », cf. Bellet et Banet, 2021).

C'est ce modèle, présenté dans la figure ci-dessous, qui servira de cadre théorique général pour l'étude combinée de l'acceptabilité, de l'acceptation et de la satisfaction d'usage dans le projet MOB-AUTO².

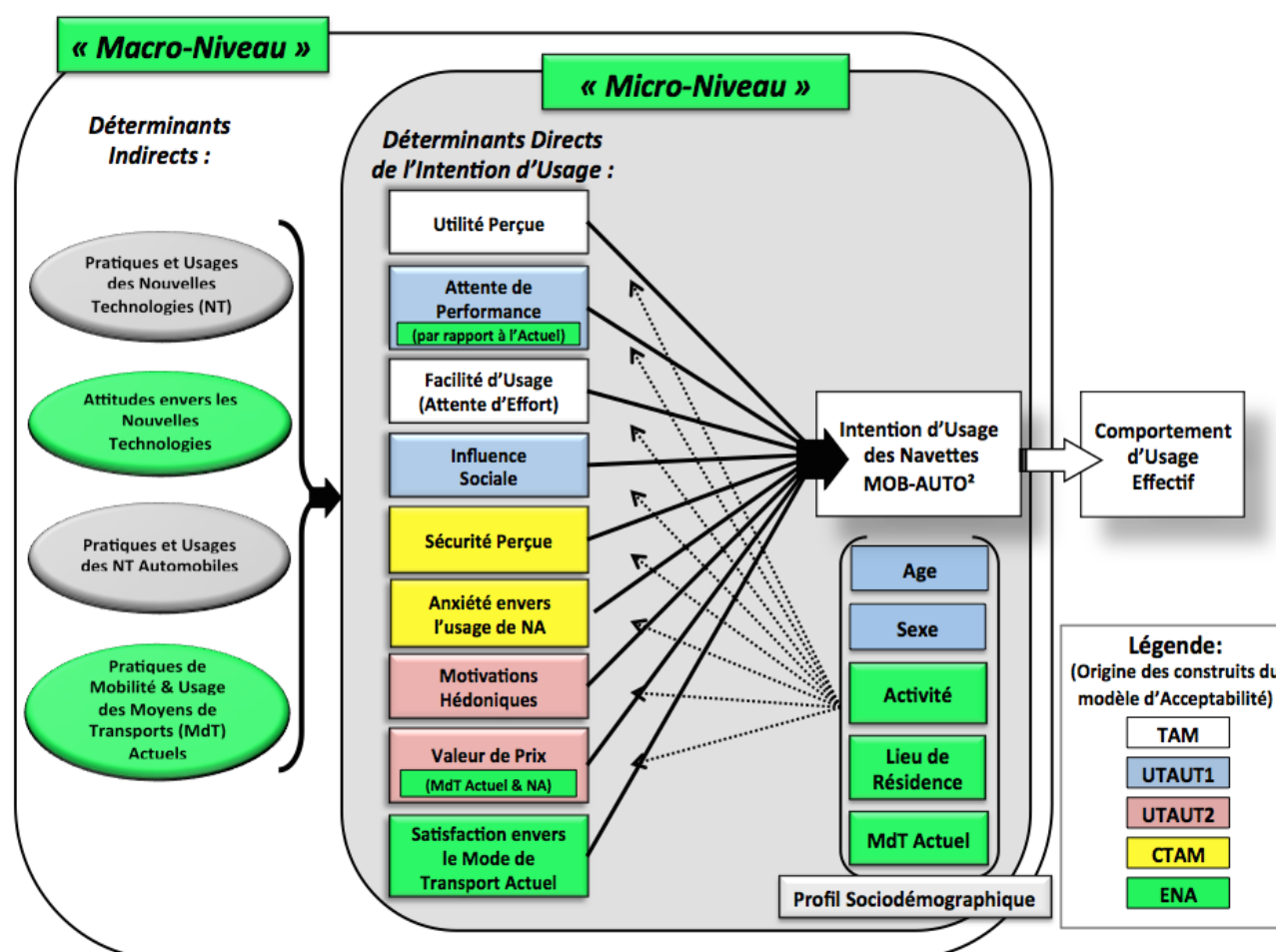


Figure 10 : Le Modèle d'Acceptabilité de véhicules Autonomes « UTAUT-4AV » élaboré et validé dans le cadre du projet ENA (Bellet et Banet, 2021 ; 2024)

Synthétiquement, ce modèle est composé de deux niveaux d'analyses complémentaires. Un niveau « macro », qui est focalisé sur les déterminants plus indirects de l'acceptabilité (i.e. attitudes envers les Nouvelles Technologies (NT), pratiques et usage de ces NT, expérience d'utilisation des aides à la conduite, pratiques de mobilité personnelles et moyen de transport utilisé actuellement de façon privilégiée), et un niveau « micro », plus

spécifiquement focalisé sur les déterminants directs de « *l'intention d'usage* » des véhicules autonomes au sens strict.

Les travaux réalisés durant le projet ENA ont permis de montrer qu'à ce second niveau, le modèle UTAUT4-AV permettait d'expliquer 89% de la variance de l'intention d'usage de navettes autonomes (Bellet et Banet, 2024), en considérant 9 facteurs principaux :

- 1) l'**Utilité Perçue**, facteur originellement identifié dans le modèle TAM de Davis (1989), et qui renvoie dans le cadre spécifique des navettes autonomes à la capacité de ce nouveau mode de transport à répondre aux besoins de déplacements des usagers et à satisfaire leurs pratiques personnelles de mobilité,
- 2) l'**Attente de Performances** de cette nouvelle offre de mobilité **par rapport au Moyen de Transport (MdT) actuellement utilisé** (facteur adapté de l'UTAUT [Venkatesh et al, 2003] afin d'inscrire l'attente de performance dans une dimension « comparative » avec les MdT existants),
- 3) la **Facilité d'Usage** (modèle TAM), qui renvoie aux **Efforts Attendus** jugés nécessaires pour comprendre et apprendre à utiliser ce nouveau mode de transport automatisé,
- 4) la **Sécurité Perçue** (provenant du CTAM d'Osswaldet al, 2012), qui porte sur le sentiment de risque éprouvé et sur la confiance de l'utilisateur envers les technologies d'automatisation de la conduite pour garantir sa propre sécurité et celle des autres usagers,
- 5) l'**Anxiété** envers l'usage (également du CTAM), qui renvoie ici aux inquiétudes éprouvées à l'idée d'utiliser les navettes autonomes, et qui sera susceptible d'être impactée différemment selon qu'un chauffeur humain se trouvera ou non à bord du véhicule,
- 6) les **Motivations Hédoniques**, se référant au plaisir d'usage, dimension introduite dans l'UTAUT2 par Venkatesh et al (2012) mais s'inspirant aussi des travaux de *User Experience* (UX), tels que ceux de Hassenzahl (2005, 2008),
- 7) l'**Influence Sociale** (facteur issu de l'UTAUT) se rapportant à l'image de soi et à l'avis des proches (famille, amis, collègues, etc) quant à l'utilisation de ce nouveau mode de transport,
- 8) la « **Valeur de Prix** », renvoyant au *coût* et au *rapport qualité/prix* des trajets effectués en navettes (dimension introduite dans l'UTAUT2 en 2012),
- 9) la **Satisfaction envers Mode de Transport utilisé actuellement**, nouvelle dimension identifiée dans le projet ENA (Bellet et Banet, 2021), en considérant que moins les personnes seront satisfaites de leur mode de transport actuel, plus l'acceptabilité d'un nouveau mode devrait être élevée (et vice versa).

4.4 Méthodologie déployée pour la collecte de données et l'évaluation de l'acceptabilité/acceptation dans MOB-AUTO²

La méthodologie déployée et les questionnaires utilisés s'inscriront dans la continuité des travaux réalisés antérieurement dans le projet ENA-AURA en matière d'étude de l'acceptabilité des Navettes Autonomes, tout en les adaptant néanmoins aux spécificités de l'offre de transport automatisé MOB-AUTO² (nouveau territoire, nouveau type de véhicule et trajet autoroutier, réalisé qui plus est à une vitesse beaucoup plus élevée que ce n'était le cas dans le projet ENA).

4.4.1 Données collectées pour l'enquête « d'acceptabilité sociétale » de l'offre de transport automatisé MOB-AUTO² (échantillon représentatif de la population française)

Concernant l'enquête d'acceptabilité sociétale, elle sera réalisée auprès d'un échantillon représentatif de la population française métropolitaine de 2500 personnes (selon 4 critères INSEE : l'âge, le sexe, la catégorie socio-professionnelle et le lieu d'habitation). Dans son ensemble (Figure 10), cette enquête repose sur 7 questionnaires portant respectivement sur les différents facteurs du modèle UTAUT4-AV susceptibles d'impacter directement ou indirectement l'acceptabilité et, in fine, l'intention d'usage des Navettes MOB-AUTO².

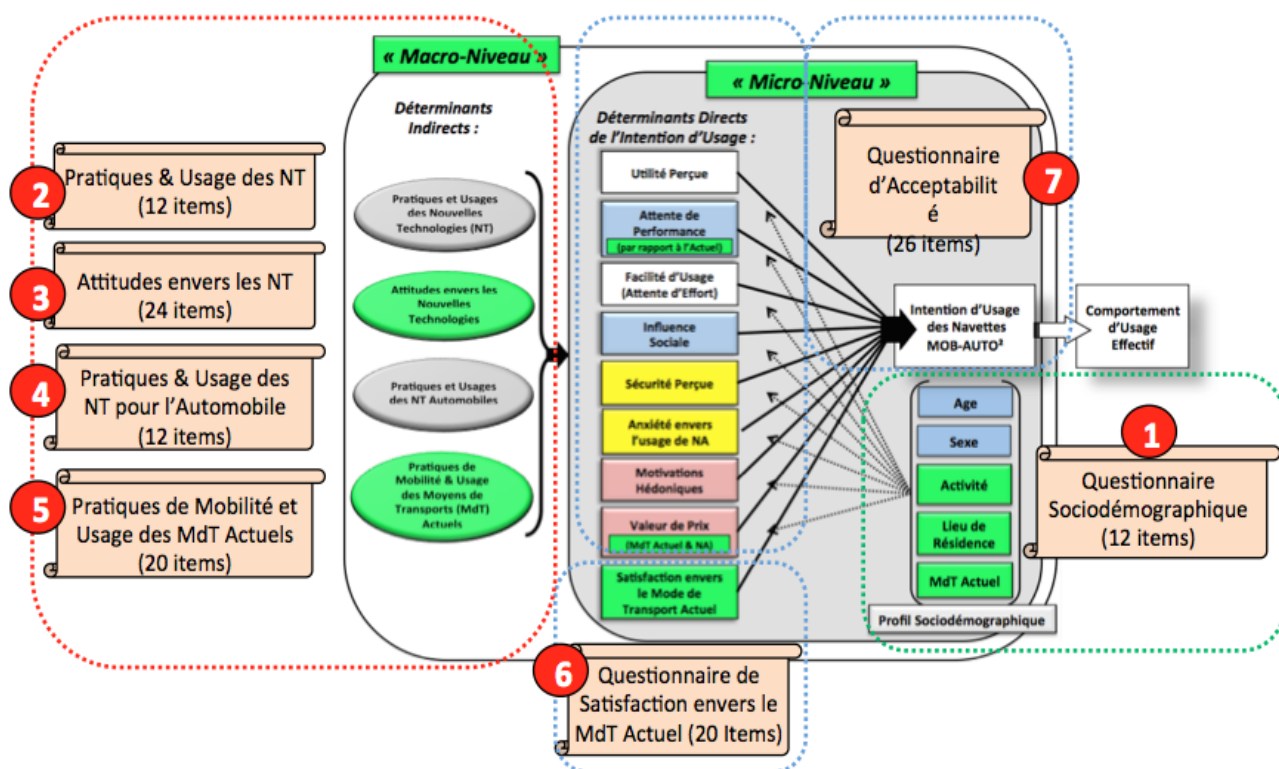


Figure 11: Différents questionnaires de l'enquête d'acceptabilité sociale des navettes MOB-AUTO²

De façon synthétique, ces 7 questionnaires représentent un total de 204 items, qui se répartissent de la façon suivante :

1) **Un questionnaire relatif aux « facteurs sociodémographiques » (12 items) :**

Ce questionnaire vise à connaître les caractéristiques générales des participants (âge, sexe, catégorie socioprofessionnelle, niveau d'études, région de résidence et taille de l'agglomération du lieu d'habitation).

2) **Quatre questionnaires sur les déterminants indirects de l'acceptabilité (représentant un total de 68 items), et portant respectivement sur :**

- Les *pratiques et les usages des Nouvelles Technologies* (NT), comme l'ordinateur, le web ou les smartphones : 12 items (portant sur l'utilisation et la fréquence d'usage de ces différentes NT).
- Les *attitudes* de chaque participant *envers les Nouvelles Technologies*, mesurées au moyen de 24 items permettant de profiler les usagers en différentes catégories (des plus « technophiles » aux plus « technophobes »).
- Les *pratiques et les usages des Nouvelles Technologies pour l'Automobile* : 12 items (portant sur l'utilisation et fréquence d'usage de 6 différents systèmes d'assistance à la conduite).
- Les *pratiques de mobilité et les modes de transports utilisés* : 20 items.

3) **Un questionnaire de Satisfaction envers le Moyen de Transport (MdT) actuellement utilisé de façon privilégiée, composé de 20 items.**

4) **Un questionnaire d'Acceptabilité** au sens strict, focalisé sur les déterminants directs de l'*Intention d'Usage* des navettes autonomes MOB-AUTO², et composé de **26 items** (présentés dans la section suivante). Afin de disposer d'éléments comparatifs, comme cela avait été réalisé dans le projet ENA, ce questionnaire sera répliqué à 4 reprises en s'intéressant non seulement aux *navettes autonomes*, mais également à trois autres types de véhicules automatisés : la *voiture autonome*, le *robot-taxi* et le *véhicule volant autonome*. Au final, cette section de l'enquête représente donc un total de **104 items** (26 x 4).

4.4.2 Données collectées pour l'enquête d'acceptabilité/d'acceptation auprès d'une cohorte d'utilisateurs, avant et après l'utilisation des navettes

Le questionnaire utilisé dans MOB-AUTO² pour l'étude de « l'acceptabilité avant usage » et de « l'acceptation après utilisation » des navettes autonomes auprès des cohortes d'utilisateurs (de 50 à 60 personnes par phase expérimentale) se compose d'un même questionnaire de 26 items (modulo une formulation légèrement différente « avant » et après « usage »), pour lesquels les participants doivent se prononcer au moyen d'échelles numériques allant de 0 (s'ils ne sont « pas du tout d'accord » avec la proposition) jusqu'à 100 (s'ils sont « totalement d'accord »). Ces items portent sur les différents déterminants directs de l'intention d'usage, à savoir :

1) L'**Utilité Perçue** d'un service de mobilité reposant sur des Navettes Autonomes (NA) :

- Je pense que les NA me seraient utiles dans mes pratiques personnelles de mobilité.
- Les NA pourraient améliorer ma mobilité et accroître mon autonomie.
- Je pense que les NA répondraient bien à mes besoins personnels de mobilité.

2) Les **Performances Attendues** d'un service de mobilité reposant sur des NA par rapport au Moyen de Transport (MdT) actuel :

- Les NA répondraient mieux à mes besoins de mobilités que le moyen de transport que j'utilise actuellement.
- L'utilisation des NA pour mes déplacements serait plus confortable que la manière dont je me déplace actuellement.
- Les navettes autonomes seraient un moyen plus efficace / rapide que les moyens de transports que j'utilise actuellement pour me déplacer.

3) L'**Effort Attendu** (i.e. à produire) pour utiliser les navettes :

- Je pense qu'il me serait difficile de comprendre comment utiliser une navette autonome.
- Pour savoir comment utiliser une NA, il faudrait que quelqu'un m'aide ou m'explique comment faire.
- Cela me demanderait beaucoup de temps et d'efforts pour apprendre à utiliser une NA.

4) L'**Influence Sociale** sur l'intention d'usage :

- Je pense que mon entourage (proches, famille, amis) serait favorable à ce que j'utilise les NA.
- Je serais plus enclin à utiliser une NA si mes amis et ma famille en utilisaient aussi.
- L'utilisation des NA me valoriserait, à mes yeux et aux yeux des autres.

5) Les **Motivations Hédoniques** pour l'utilisation des navettes :

- L'utilisation de navettes autonomes rendrait mes déplacements plus agréables.
- Je pense que l'utilisation d'une NA pourrait être source de plaisir.
- L'interaction avec une NA devrait être ludique ou amusante.

6) La **Sécurité Perçue** et la confiance envers la technologie des NA :

- Les navettes autonomes rendraient mes déplacements sûrs et sans risque.
- J'aurais confiance dans la technologie des NA pour garantir ma sécurité.
- J'aurais confiance dans la technologie des NA pour garantir la sécurité des autres usagers (piétons, cyclistes, autres véhicules)

7) L'**Anxiété** ressentie à l'idée d'emprunter une navette, notamment en fonction de la présence d'un chauffeur à bord :

- L'utilisation d'une navette autonome serait source d'inquiétudes pour moi.
- Je refuserai catégoriquement de monter dans une NA s'il n'y a pas de chauffeur humain à bord.
- L'absence de chauffeur à bord des navettes autonomes n'est pas un problème pour moi, si un opérateur humain peut intervenir à distance en cas de besoin.

8) La « **Valeur de Prix** » du service de mobilité automatisée Mobauto²:

- Je pense que l'utilisation de navettes autonomes pour se déplacer sera « bon marché ».
- Je pense que les NA devraient offrir un bon rapport « qualité/prix », en matière de mobilité.

9) Enfin, l'**Intention d'Usage** des Navettes Mobauto² sera pour sa part évaluée au moyen de 3 items :

- *Si je le pouvais, je changerais mon moyen de transport actuel pour une NA.*
- *Je souhaiterais pouvoir utiliser des NA pour mes déplacements quotidiens (travail, école, etc.).*
- *Je pense que je serais satisfait(e) par l'utilisation d'une NA pour réaliser mes déplacements.*

4.4.3 Données collectées pour l'enquête de « satisfaction d'usage »

Comme nous l'avons souligné, pour que la nouvelle offre de mobilité MOB-AUTO² soit adoptée ses utilisateurs et qu'ils se l'approprient dans le long terme, cela dépendra de leur(s) expérience(s) d'utilisation(s) et de la satisfaction qu'ils en auront retirée. Si cette expérience est jugée « positive » par l'usager (au sens de Hassenzahl, 2005), alors il pourra décider de la renouveler et d'intégrer in fine le service MOB-AUTO² dans ses propres pratiques de mobilité, a fortiori si ce mode de transport lui apporte plus de satisfaction que celui qu'il utilise actuellement. En revanche, si cette expérience n'est pas jugée satisfaisante par l'utilisateur, voire qu'elle est source d'inquiétude, alors celui-ci renoncera à utiliser cette nouvelle offre de mobilité.

L'enquête de satisfaction visera ainsi à collecter un *retour d'expérience* auprès des membres de la cohorte, mais aussi de tous les usagers du service MOB-AUTO², immédiatement à l'issue de leur trajet en navette. Cette enquête se devra d'être très synthétique afin de ne pas prendre plus de 5 minutes pour être complétée. Dans son ensemble (outre le profil sociodémographique qui sera collecté au préalable sur l'application MILLA), le questionnaire de satisfaction sera donc composé de 7 questions principales seulement :

- 1) *Êtes-vous satisfait de votre trajet en Navette Autonome ?*
- 2) *Le trajet en NA a-t-il été confortable ?*
- 3) *Vous sentiez-vous en sécurité dans la Navette ?*
- 4) *Jugez-vous les NA comme un moyen de transport efficace (en termes de temps de parcours/vitesse) ?*
- 5) *Est-ce que ce trajet en Navette a été une expérience agréable ?*
- 6) *Recommanderiez-vous le service MOBAUTO2 à votre entourage (famille, collègues, amis) ?*
- 7) *Si cela était possible, souhaiteriez-vous pouvoir utiliser les NA pour tous vos déplacements quotidiens ?*

5 Évaluation socio-économique

5.1 Objectif

L'objectif de cette tâche est de réaliser l'évaluation socio-économique de l'introduction du service de navette autonome. L'évaluation prend la forme d'une analyse coûts-avantages, qui vise à quantifier monétairement quelle valeur le service de navette autonome (NA) apporte à la collectivité. La « collectivité » regroupe diverses catégories d'acteurs, incluant notamment les usagers directs du service, les autres usagers des transports, l'opérateur, les riverains, la collectivité ... L'analyse coûts-avantages permet de mettre en regard les impacts positifs du service avec les coûts qu'il peut engendrer. Les impacts positifs pourront typiquement inclure les gains de temps, de confort, voire d'argent pour les usagers du service, mais aussi pour les autres usagers des transports (via le report modal et la décongestion de la route voire des autres lignes de transport en commun) ... Les coûts incluront quant à eux typiquement les coûts de capital (véhicules, infrastructures de guidage et de supervision...) et d'exploitation liés à mise en œuvre du service, la subvention du service par la collectivité (le cas échéant), ainsi que les moindres retombées fiscales liées à la réduction de l'usage de la voiture ... Les impacts en termes de sécurité et environnementaux pourront être positifs ou négatifs en fonction de l'intensité d'utilisation du service. Enfin l'impact sur les entreprises locales et les retombées économiques indirectes, comme les économies d'agglomération, seront potentiellement étudiées.

5.2 Description du processus

Le processus comprend quatre étapes principales :

1. Cadrage général
2. Caractérisation du service de navettes autonomes
3. Simulation de l'impact du service de navette automatisée sur le système de transport local
4. Bilan coûts-avantages

Celles-ci permettent de réaliser l'analyse coûts-avantages comme représenté sur le schéma fonctionnel suivant :

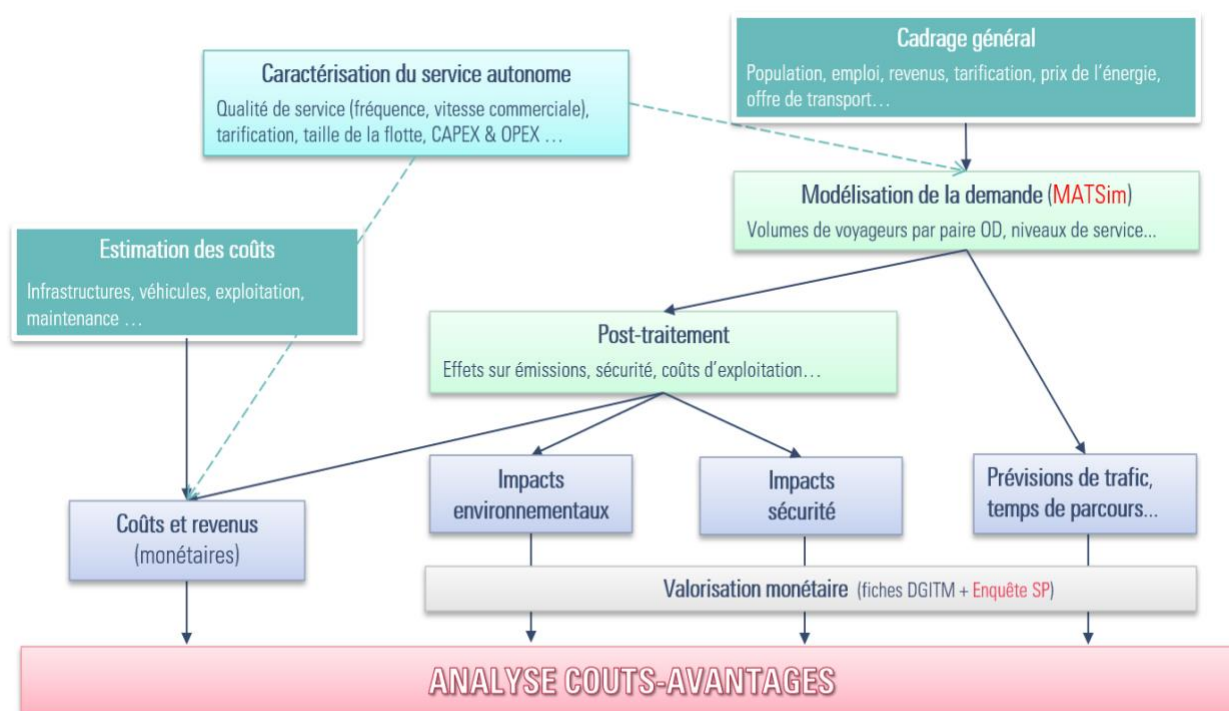


Figure 12 : Schéma fonctionnel de l'analyse coûts-avantages

1. **Cadrage général** : le cadrage général vise à déterminer le scénario (et l'option) de référence pour l'évaluation avec l'ensemble des hypothèses socio-économiques associés (populations, emplois, revenus, prix de l'énergie...). Cette étape implique notamment la description du lieu d'implantation du service de la navette automatisée sous les aspects géographique, social, économique et environnemental. Cette contextualisation est essentielle pour bien comprendre la situation initiale (le diagnostic du territoire) et les dimensions à considérer pour l'évaluation.

Il conviendra à cette fin de collecter divers types de données :

- *Socioéconomiques* : populations, emplois, revenus
- *Offre de transport* : niveaux de service, tarification, projets prévus à l'horizon de simulation...
- *Demande de transport* : la récolte des pratiques de mobilité actuelles (EGT, matrices O-D, données de comptage) permettra de s'assurer de la qualité du modèle de mobilité dans la situation de référence, c'est à dire en l'absence du service de mobilité autonome.

2. **Caractérisation du service de navettes autonomes** : la deuxième étape vise à déterminer l'option de projet, c'est à dire les caractéristiques du (ou des) scénario de navettes autonomes qui sera évalué. Cela implique de définir :

- a. la qualité de service : confort, fréquence, vitesse commerciale, capacité des véhicules...
- b. la tarification : intégration tarifaire aux transports publics franciliens, tarification dédiée...
- c. les coûts financiers : coûts de capital et d'exploitation liés à la mise en œuvre du service
- d. les coûts externes : impacts environnementaux, sécurité

Cette étape pourra s'appuyer sur les résultats des autres tâches, en particulier sur les tâches 5.1 (Impacts sur le trafic et ses externalités) et 5.4 (Dimensionnement optimal du service).

3. **Simulation de l'impact du service de navette automatisée sur le système de transport local** : cette étape consiste à prédire l'impact du futur service sur le système de mobilité, en se basant sur des modélisations et prévisions à partir des données collectées. L'analyse se concentre sur la zone d'influence et le cadre temporel définis dans le cadre de l'expérimentation. Une *enquête de préférences déclarées* sera également réalisée afin de mieux estimer l'attractivité du service de mobilité autonome en fonction de la qualité de service proposée.

4. **Bilan coûts-avantages** : cette dernière étape vise à réaliser l'évaluation socio-économique du service de NA à l'aide des résultats de simulation et des données collectées. Des analyses de sensibilité seront également menées afin de vérifier la robustesse des résultats.

5.3 Modélisation et enquête

Afin de réaliser les prévisions de trafic décrites ci-dessus, nous employons une approche de modélisation multi-agents. Cette approche permet de modéliser les chaînes de déplacements au niveau des individus et de considérer les interactions entre voyageurs et véhicules autonomes à la demande, contrairement aux modèles à 4 étapes qui sont de nature agrégée. Nous utilisons le modèle MATSim, abréviation de Multi-Agent Transport Simulation. MATSim est un modèle ouvert utilisé dans de très nombreuses métropoles mondiales, et permettant de simuler des systèmes complexes de mobilité urbaine. Les données qui en résultent permettent d'analyser les schémas de mobilité des individus et d'évaluer l'impact potentiel de diverses politiques et interventions en matière de transport. MATSim est conçu pour gérer des simulations à différentes échelles, des petites zones urbaines aux grandes régions métropolitaines. Cette évolutivité le rend adapté à la planification et à l'analyse locales et régionales.

MATSim utilise une approche de modélisation basée sur les agents, où des entités individuelles (agents) représentent les voyageurs ou les véhicules, chacun étant capable de prendre des décisions indépendantes. Ces agents interagissent entre eux et réagissent aux conditions dynamiques de la simulation. MATSim intègre une représentation détaillée du réseau de transport, y compris les routes, les transports en commun et les autres modes de transport. Il simule le mouvement dynamique des agents sur ce réseau au fil du temps.

Afin de calibrer le modèle, nous utiliserons les données collectées lors du cadrage général. Une **enquête de préférences déclarées** sera également réalisée afin de capturer le comportement des usagers face au service de navettes autonomes. Celle-ci a une double utilité puisqu'elle permettra à la fois d'aider à la calibration du choix modal dans le modèle MATSim, mais également à déterminer le surplus des usagers lors du bilan socio-économique du service.

5.4 Données d'entrée et sorties de l'évaluation

- **Entrées :**
 - Données socio-démographiques : populations, emplois, revenus...
 - Offre de transport : réseau routier, GTFS du réseau de transport en commun
 - Caractéristiques du service de navettes autonomes : nombre de véhicules, temps de parcours
 - Enquête de préférences déclarées : réponses d'usagers du service (100 à 200 réponses) et de non usagers (500 à 1000 réponses)
- **Sorties :**
 - Prévisions de fréquentation pour le service de navettes autonomes
 - Bilan socio-économique des scénarios de navettes autonomes

6 Dimensionnement optimal du service

Cette section aborde la question du dimensionnement optimal du service au-delà de l'expérimentation et dans une perspective d'exploitation commerciale en se focalisant sur le **design optimal** et la gestion de la demande de déplacements utilisant la navette automatisée via la mobilisation de de stratégies incitatives pour le management de la demande.

6.1 Objectif

L'objectif principal de cette tâche est de déterminer le dimensionnement optimal du service de navette automatisée en mesurant les impacts directs et en quantifiant le fonctionnement optimal. Cela sera réalisé grâce à une approche combinant des **stratégies de management de la demande et des mécanismes incitatifs** (T.5.2) et **des techniques d'optimisation intégrant un modèle discret de choix multi-modal** et la prise en compte de l'offre de transport existante dans la zone (T.5.4).

6.2 Description du processus

Dans le cadre de la définition du dimensionnement optimal du service, on s'intéresse aux trois phases décrites ci-dessous :

- 1) Dans un premier temps, un dimensionnement optimal du service de la navette **avant la mise en place de stratégies incitatives** sera étudié (i.e. avec une demande initiale). Deux tâches principales sont à effectuer dans ce cas-là :
 - a) L'identification des usagers non captifs (usagers autosolistes susceptibles de modifier leur mode transport par véhicule particulier vers la navette automatisée) : Ces derniers pourront être identifiés à partir d'une analyse spatio-temporelle fine des patterns de la demande (les flux origines-destinations) ainsi que le processus de décision du choix modal de cette catégorie d'usagers. Le but final étant de construire un modèle discret de choix multi-modal de ces usagers non captifs dans l'objectif de bien déterminer les raisons pour lesquelles ils préfèrent le véhicule particulier et les conditions dans lesquelles ils seraient capable de changer de mode de transport. Ainsi, l'exploration des solutions possibles peut s'orienter vers celles qui maximiseraient la captation de ces usagers.
 - b) Proposer un/des ordonnancements optimaux du service de la navette, en intégrant le modèle discret de choix multi-modal construit précédemment. Un ensemble d'objectifs d'optimisation dans ce cas seront étudiés (la part du report modal capturé par la navette, temps du trajet de la navette, temps d'attente des usagers, impact sur le trafic...).
- 2) Dans un second temps, le même processus décrit précédemment sera effectué mais **en mettant en place des stratégies de management de la demande et des mécanismes incitatifs**. Trois stratégies de gestion de la demande sont envisagées dans ce cadre :
 - a) La **tarification différenciée** qui reviendrait à financer une partie du coût d'exploitation des navettes par une augmentation du coût des péages des autres véhicules favorisant ainsi le report modal
 - b) La création d'une **stratégie d'incitation à points**, qui consisterait à gagner des réductions de péage (voir un accès gratuit certains jours) en voiture personnelle par l'utilisation de la navette. L'idée est de d'offrir un accès premium (voiture personnelle sur l'autoroute) à coût réduit en récompense d'un usage fréquent du service de navette. Deux éléments clés de cette stratégie est (i) la réduction offerte sur l'autoroute et (ii) le nombre de trajets en navette nécessaire pour l'obtenir
 - c) La troisième stratégie est plus radicale et s'appuie sur le **concept de crédits échangeables**. L'idée serait que les usagers autosolistes locaux (qui font habituellement le trajet sur la même portion que la navette) reçoivent tous un droit d'accès à l'autoroute en voiture personnel limité, e.g. Un ou deux par semaine. Sans ce crédit d'usage, ils ne peuvent pas prendre leur voiture et doivent donc se rabattre sur les autres alternatives (navettes ou co-voiturage). Ces crédits sont échangeables entre individus sur une plateforme d'échange (type marché) où les utilisateurs peuvent vendre leur crédit ou acheter les crédits mis à disposition par les autres utilisateurs. L'avantage de cette option est que les usagers utilisant tous

les jours la navette peuvent revendre leurs crédits et ainsi permettre à d'autres usagers d'utiliser plus leur voiture que l'allocation initiale des droits.

Ces stratégies auront pour impact principal de changer les coûts perçus par les usagers ce qui impose une recalibration des modèles de choix discrets.

- 3) Enfin, les bénéfices d'**intégrer toute l'offre de transport de la zone dans le problème de dimensionnement optimal** sera étudiée. Dans ce cas, on ne s'intéressera plus qu'au service de la navette, mais à toutes les offres de transport en commun dans cette zone. L'intérêt étant d'étudier l'impact que pourrait avoir un processus de collaboration entre les différentes offres de transport sur un éventuel report modal depuis le véhicule particulier.

Une représentation résumée du processus est présentée dans la figure ci-dessous.

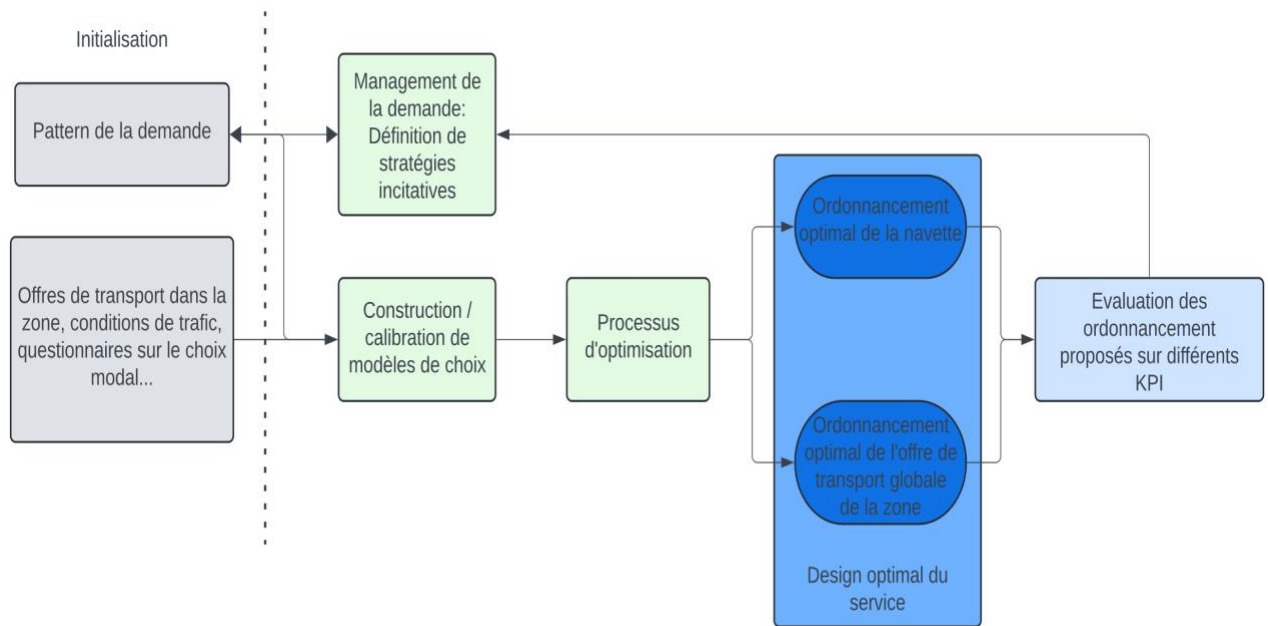


Figure 13 : Processus du dimensionnement optimal du service.

6.3 Modélisation

On distingue dans cette tâche deux défis scientifiques principaux :

- 1) Afin de définir un dimensionnement et ordonnancement optimal du service, il faudra intégrer des modèles de choix discrets, qui sont connus pour être fortement non-linéaires et non-convexes à des formulations mathématiques pour des problèmes d'ordonnancement qui sont tractables. Dans ce cas deux options seront étudiées :
 - a) On s'intéressera au framework développé par [Paneque et al., 2021] qui a pour but l'intégration des modèles de choix discret à des modèles de programmation linéaire en nombres entiers. La tractabilité de ces modèles intégrés reste un défi important et sera abordé par des approches de décompositions tels que les décompositions de Benders' ou de Dantzig-Wolfe.
 - b) L'intégration des modèles de choix discrets à des modèles de programmation par contraintes. Ces derniers peuvent intégrer des modèles non-linéaire et sont connus pour être très performants pour des problèmes d'ordonnancement.

Sur l'estimation des modèles de choix discrets à proprement parler, nous nous appuyerons sur une approche hybride couplant une étude bibliographique et l'analyse des réponses aux questionnaires réalisés auprès des utilisateurs de

la navette. Les éléments qui seront pris en compte seront notamment : la vitesse de la navette, la fréquence, les temps d'attente et les coûts.

- 2) Pour l'étude des stratégies de management de la demande, le principal défi est le calcul de l'équilibre système incluant l'impact sur les choix modaux et le fonctionnement du service pour une valeur de prix ou une mesure d'incitation donnée. Une fois l'équilibre défini, nous utiliserons des processus d'optimisation afin de déterminer les paramètres du schéma de gestion de la demande (prix, nombre de bonus,...). Deux méthodes sont envisagées à ce stade :
- a) Utiliser des heuristiques de type recuit simulé ou des algorithmes génétiques qui seront interfacés avec la simulation dynamique du système pour étudier les impacts sur le fonctionnement du système. Un élément essentiel sera de mettre en place des processus d'optimisation qui s'appuie sur un horizon temporel de plusieurs jours afin de pouvoir travailler sur des solutions de type bundle ou crédit échangeables.
 - b) Nous étudierons également si la simulation dynamique ne peut pas être remplacé par un modèle simplifié (méta-modèle) afin d'améliorer les temps calculs voir créer un outil simplifié d'aide à la décision concernant le choix des stratégies d'incitation.

L'autre élément critique pour la modélisation est de compléter les modèles de choix modaux pour intégrer la sensibilité aux stratégies de régulation de la demande. Les travaux existants dans la littérature donnent déjà une bonne idée de l'élasticité/sensibilité au prix des choix au travers de la notion de fonction de coût généralisée. Cependant, nous profiterons de l'enquête réalisée auprès des utilisateurs de la navette pour intégrer dans le questionnaire des questions spécifiques sur leur sensibilité au prix ou aux mécanismes d'incitation que nous souhaitons développer. Cela permettra un calibrage plus fin des coefficients des fonctions de coût généralisées.

L'évaluation de l'efficacité des solutions proposées par les modèles décrits ci-dessus sera effectuée en utilisant une approche hybride données/simulations dynamiques (en utilisant des outils de simulation tels que MatSim, Symuvia ou Sumo). Ces outils permettront de simuler les scénarios de gestion de la demande et d'étudier l'influence des différents facteurs sur le choix modal individuel. Le cadre d'optimisation tirera parti de diverses contraintes et paramètres de coût basés sur les données concernant la demande existante, le choix modal, le calendrier, ainsi que les informations sur la consommation énergétique et la recharge de la navette. De plus, les données de fréquentation autoroutière et d'usage des bus sur les tronçons d'autoroute où le service sera opéré seront également considérées.

6.4 Données d'entrée et sorties de l'évaluation

- **Données d'entrée nécessaires** : Données temporelles de flux de trafic et de vitesse/temps de parcours collectées via des caméras de surveillance ou des drones. Données sur l'offre de mobilité, incluant les horaires de la navette, le nombre de passagers par trajet, et les enregistrements de dysfonctionnements et réparations. Des enquêtes/questionnaires sur les processus de décision des choix modal des non-usagers.
- **Sorties** : Un ordonnancement (i.e. un plan de transport : fréquence, heures de départs et arrivés) optimisé pour la navette qui maximisera l'utilisation/charge du véhicule et réduira le nombre de rotation. Une analyse détaillée des patterns de demande et des conditions de circulation avant et après le déploiement de la navette. Une évaluation des stratégies incitatives pour encourager le transfert modal et leur impact potentiel sur la réduction du temps de déplacement, la variation du taux d'accidents, et l'efficacité globale de la mobilité. Scénarios de déploiement optimal de la navette en fonction de la demande sur les trajets (partiels ou complets) susceptibles d'être servis par la navette

7 Contributions au bien commun

La méthodologie d'évaluation mise en œuvre dans le cadre du projet MOB-AUTO² permet d'enrichir le corpus du bien commun relatif au déploiement et à l'évaluation des services de navettes automatisées. En effet, la méthodologie développée ici fournit des orientations sur la façon de poser les bases d'une évaluation réussie lors de la phase d'élaboration d'un plan d'évaluation réussi pour le déploiement d'un service de mobilité automatisée, connectée et coopérative (CCAM). Elle vise à garantir une évaluation scientifiquement solide, fournissant des informations fiables pour contribuer à la prise de décision et l'élaboration de politiques, tant pour l'industrie que pour les autorités. Cette méthodologie s'articule autour de l'évaluation des impacts sur le trafic et ses externalités, à l'acceptation et l'acceptabilité, ainsi qu'à l'évaluation socio-économique déployée dans le cadre du projet MOB-AUTO² vise à consolider et améliorer les méthodes développées précédemment dans les projets EVRA ENA et SAM.

La démarche méthodologique développée pourra ainsi alimenter le référentiel d'évaluation des projets de transport élaboré par la DGITM, et aider les collectivités dans le déploiement de ces services (choix du tracé, dimensionnement, etc.). Par ailleurs, le projet enrichit ce corpus méthodologique par deux volets complémentaires :

- 1) Le volet évaluation a priori utilise une démarche originale en environnement contrôlé, s'appuyant sur une reproduction du comportement de la navette automatisée dans diverses situations via une simulation phygitale.
- 2) Le dimensionnement optimal du service aborde la question du dimensionnement optimal au-delà de l'expérimentation, dans une perspective d'exploitation commerciale, en se focalisant sur le design optimal et la gestion de la demande de déplacements utilisant la navette automatisée, grâce à la mobilisation de stratégies incitatives pour le management de la demande.

8 Références

1. Bel M., Coeugnet S., & Watteau P. (2019), Acceptabilité du véhicule autonome, Monographie de l'Institut Vedecom.
2. Bellet, T., Bornard, J. C., Richard, B., & Laverdure, S. (2018). Use of a cognitive simulation model of the driver to support the Virtual Human Centred Design (V-HCD) of ADAS and automated vehicles. In Graz Symposium Virtual Vehicle.
3. Bellet, T., Banet, A. (2021). Enquête d'acceptabilité sociétale des navettes autonomes, livrable ENA L1.1.1, 136 pages.
4. Bellet, T., & Banet, A. (2023). UTAUT4-AV: An extension of the UTAUT model to study intention to use automated shuttles and the societal acceptance of different types of automated vehicles. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 99, 239-261.
5. Bellet, T., Rayon T., Banet, A. (2023). Résultats de l'enquête d'acceptation terrain (auprès des utilisateurs de la navette), cas d'usage par cas d'usage, livrable ENA L4.7.2, 58 pages.
6. Ciuffo, B., Mattas, K., Makridis, M., Albano, G., Anesiadou, A., He, Y., Josvai, S., Komnos, D., Pataki M., Vass, S., Szalay, Z., (2021) Requiem on the positive effects of commercial adaptive cruise control on motorway traffic and recommendations for future automated driving systems, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103305>
7. Davis, F. D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. MIS Q.
8. De Gelder, E., Paardekooper, J.-P, Op den Camp, O. & de Schutter, B. (2019) Safety assessment of automated vehicles: how to determine whether we have collected enough field data?, Traffic Injury Prevention, 20:sup1, S162-S170, <https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1602727>
9. Distler, V., Lallemand, C., & Bellet, T. (2018). Acceptability and Acceptance of Autonomous Mobility on Demand : The Impact of an Immersive Experience. Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174186>
10. Frame (2024). EU-CEM Handbook, Draft Version, 2024.
11. Hassenzahl, M. (2005). The Thing and I : Understanding the Relationship Between User and Product (Vol. 3, p. 31-42).
12. Hassenzahl, M. (2008). User Experience (UX): Towards an experiential perspective on product quality. In Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM '08), Metz, France, 2-5 September, 11-15.
13. Innamaa, S., et al. (2018). Trilateral Impact Assessment Framework for Automation in Road Transportation:Version 2,0.
14. Innamaa, S., et al. (2020). L3Pilot Deliverable D3,4: Evaluation Plan.
15. Osswald, S., Wurhofer, D., Trösterer, S., Beck, E., & Tscheligi, M. (2012). Predicting information technology usage in the car: towards a car technology acceptance model. In Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, 51-58.
16. Paneque, M. P., Bierlaire, M., Gendron, B., & Azadeh, S. S. (2021). Integrating advanced discrete choice models in mixed integer linear optimization. Transportation Research Part B: Methodological, 146, 26-49.
17. Payre, W., Cestac, J., & Delhomme, P. (2014). Intention to use a fully automated car: Attitudes and a priori acceptability. Transportation research part F: traffic psychology and behaviour, 27, 252-263.
18. Schade, J., & Schlag, B. (2003). Acceptability of urban transport pricing strategies. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour , 6 (1), 45-61.
19. Schuitema, G., Steg, L., & Forward, S. (2010). Explaining differences in acceptability before and acceptance after the implementation of a congestion charge in Stockholm. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(2), 99-109.
20. Venkatesh, V., & Bala, H. (2008). Technology acceptance model 3 and a research agenda on interventions. Decision sciences, 39(2), 273-315.
21. Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. MIS Quarterly , 425-478.
22. Venkatesh, V., Thong, J. Y., & Xu, X. (2012). Consumer acceptance and use of information technology: Extending the unified theory of acceptance and use of technology. MIS quarterly, 36(1), 157-178.

23. Zhang, X., Sun, J., Qi, X., & Sun, J. (2019). Simultaneous modeling of car-following and lane-changing behaviors using deep learning. *Transportation research part C: emerging technologies*, 104, 287-304.