

Mobilité routière automatisée et connectée Stratégie nationale



Systèmes de transport routier automatisés : éléments d'éclairage économique

Document de travail



<https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/transport-routier-automatise-connecte>

Systèmes de transport routier automatisés : éléments d'éclairage économique

Document de travail

Ce document vise à présenter de premiers éléments d'éclairage de la pertinence économique des systèmes de transports routiers automatisés, en s'intéressant aux transports de voyageurs.

L'approche retenue consiste à analyser la pertinence économique par comparaison d'une solution automatisée et d'une solution non automatisée, pour un même service de transport, au travers de l'écart des coûts totaux d'exploitation (total cost of operation – TCO).

(NB : Ce faisant, l'approche proposée laisse sciemment de côté l'analyse économique de la pertinence de la création d'un service de transport sui generis, dont on connaît les difficultés méthodologiques dans le domaine des transports, en particulier des transports publics dans lesquels les avantages économiques sont largement non marchands et non reflétés dans la tarification).

Cette approche est riche d'enseignements, en pouvant répondre à deux types de questions : quels gisements de réduction des coûts, pour un même niveau de service, peut-on attendre de l'automatisation d'un service existant ? quelle amélioration du bilan coûts-avantages d'un nouveau service de transport peut-on escompter en recourant à une solution automatisée ?

L'approche retenue dans ce document a consisté à développer un modèle de TCO intégrant toutes les composantes de coûts, et les distinguant en fonction de leur inducteur de coût (cost-driver), notamment ceux liés à la taille de flottes (coûts attachés aux véhicules), et d'isoler les coûts fixes. Cette approche permet notamment de faire apparaître les rendements d'échelle et les possibilités de mutualiser certains coûts au sein d'un service ou entre services (automatisés ou non). Le modèle s'appuie notamment sur des hypothèses de mutualisation (de l'intervention à distance et des interventions sur les parcours), avec d'autres fonctions proches pouvant exister pour des transports publics non automatisés (centres de supervision, équipes d'intervention sur le terrain, centres de maintenance).

L'approche a été construite avec l'écosystème des transports publics automatisés, réuni au sein de France Véhicules Autonomes (FVA – Groupe STPA – transports publics). En synthèse, le modèle de TCO et ses inducteurs de coûts a été construit par la DGITM, le consensus sur l'ordre de grandeur des coûts est issu de l'éco-système¹ (le mode de travail de l'éco-système, qui porte sur des données agrégées à un horizon de moyen terme de 2030) garantit que les entreprises concernées, potentiellement concurrentes sur ces futurs marchés, n'échangeaient pas de données sur leur offre ou leurs perspectives de marché).

En substance, le modèle élaboré permet de préciser et de documenter l'idée simple selon laquelle la pertinence de ces services dépend de l'arbitrage entre coûts de la conduite dans les véhicules et coûts de l'intervention et de la supervision à distance.

¹ Dans les hypothèses retenues dans ce document, celle relative au coût des systèmes automatisés des véhicules particuliers, type robo-taxi, est issue de références autres que celles produites au sein de FVA/STPA.

Le modèle a notamment permis de mettre en lumière l'importance des hypothèses de fiabilité des systèmes automatisés et des références de niveau de service attendu. Ainsi, en synthèse, si l'on vise des niveaux de service élevés (i.e. sans interruptions notables des dessertes), alors des niveaux de fiabilité technique des systèmes peu satisfaisants (comme cela peut se concevoir en période de faible maturité des technologies), vont devoir solliciter des ressources d'intervention à distance ou sur les parcours pour résoudre les interruptions de service, ce qui pénalise fortement la pertinence économique. Lorsque les niveaux de fiabilité technique s'améliorent, ces besoins de ressources d'intervention à distance ou sur les parcours diminuent, permettant alors une réduction du TCO du service automatisé par rapport à l'équivalent non automatisé. Un autre apport du modèle porte sur l'identification des économies d'échelle permises par l'existence de coûts fixes de mise en place du service.

Ce document se présente en trois parties :

- Dans un premier temps, il présente la structure du modèle de TCO et les principales hypothèses de coûts prévisionnels de référence ; à ce titre, il détaille le sous-modèle statistique permettant de dimensionner les ressources d'intervention à distance et sur le terrain, en fonction du niveau de service attendu et de la fiabilité technique des systèmes (taux d'insuffisances fonctionnelles² face à certaines conditions de circulation)
- Dans un deuxième temps, ce document présente les résultats, et leur dépendance par rapport aux hypothèses les plus dimensionnantes : niveau de service attendu et fiabilité technique des systèmes (cf. ci-dessus) ; sur-coût lié aux équipements d'automatisation ; coût fixe de la mise en place du service. Dans cette présentation des résultats, l'hypothèse de mutualisation stricte des coûts des centres d'intervention à distance et des interventions terrain, est relâchée
- Enfin, le document présente l'application du modèle à un cas stylisé, issu d'une initiative du territoire des Collines du Perche Normand, engagé dans la conception et l'évaluation d'un projet de dessertes automatisées³, à comparer à une offre existante mêlant lignes de cars et transport à la demande : dans cette partie, l'offre de desserte automatisée est construite pour coller au mieux au niveau de service permis par l'offre existante, et le modèle de TCO y est alors appliqué ; cette partie ne peut ainsi pas être considérée à proprement parler comme l'évaluation économique d'une stratégie de desserte du territoire en question, mais illustre la question présentée plus haut : quel potentiel de réduction des coûts peut-on attendre d'un système automatisé, sous réserve des niveaux de service et de fiabilité escomptés ?

² Les termes insuffisances fonctionnelles font référence à la conséquence et en particulier à la sollicitation d'une intervention système pour répondre à l'aléa, auquel le véhicule et son système de conduite automatisé seul ne sont pas capables de répondre, par une intervention à distance pour les aléas les moins critiques et par une intervention terrain sinon.

³ Le territoire des Collines du Perche Normand a bien voulu présenter son cas pour l'instanciation du modèle proposé. Cette partie du document n'engage en aucune façon le territoire des Collines du Perche Normand dans l'évaluation ni a fortiori la décision de mettre en place un service de transport automatisé dans son domaine de compétences.

Les résultats présentés ci-après doivent être considérés comme exploratoires, ils n’engagent ni les acteurs de l’éco-système, ni la DGITM, ni le territoire des Collines du Perche Normand dans l’affirmation de la pertinence économique des solutions de transports routiers automatisés, d’autant qu’ils laissent de côté, comme indiqué en introduction, des éléments importants du bilan socio-économique non strictement incorporés dans les coûts marchands.

Table des matières

1. Modèle de coûts et principales hypothèses.....	5
1.1. Principes de comparaison entre service automatisé et non automatisé.....	5
1.2. Modèle de TCO : postes et inducteurs de coûts.....	5
1.3. Hypothèses de coûts unitaires	7
1.4. Modèle de dimensionnement de l’intervention à distance en fonction de la fiabilité	8
2. Résultats.....	10
2.1. Modèle simplifié : paramétrage du nombre de véhicules par intervenant	10
2.2. Modèle de dimensionnement de la supervision en fonction de la fiabilité	12
3. Application au cas stylisé inspiré du projet des Collines du Perche Normand	15
Annexe 1 : modèle de ressources d’intervention en fonction de la fiabilité des systèmes	18
3.1. Détails de l’équation de coûts	18
3.2. Hypothèses induites du cadre réglementaire	21
3.3. Détermination du nombre d’opérateur d’intervention à distance et terrain.....	23
Annexe 2 : résultats obtenus pour les typologies de véhicules considérées (hors navette)	25
Annexe 3 : description et représentation stylisée du cas du Perche Normand	27
Bibliographie.....	34

1. Modèle de coûts et principales hypothèses

1.1. Principes de comparaison entre service automatisé et non automatisé

L'approche repose sur la définition d'un modèle de référence et de ses coûts associés afin d'établir le différentiel de coûts d'un service de transport routier automatisé de voyageurs par rapport à un service équivalent sans conducteur à bord.

La notion de service équivalent est définie comme un service automatisé offrant le même service qu'un service de transport routier conventionnel, où, toutes choses égales par ailleurs, les véhicules sont automatisés et l'équipe de conducteurs est remplacée par une équipe d'opérateurs d'intervention à distance et d'opérateurs de terrain.

Un service se caractérise généralement, et sans s'y limiter, par son cas d'usage (par exemple du transport à la demande ou du transport en commun de personnes sur ligne régulière), son amplitude horaire et sa fréquence (lorsqu'elle existe), sa vitesse commerciale, le nombre de véhicules et leur type (notamment le type de motorisation, leur capacité, leur type de consommation).

Le modèle de coût est réfléchi à l'échelle d'un service équivalent. Il tient compte d'hypothèses de mutualisation des effectifs au niveau d'un service vis-à-vis des inducteurs de coûts. Cependant, le gain de performance du redimensionnement du service n'est pas considéré (par exemple, on ne considère pas ici les possibilités offertes par l'automatisation sur l'affectation des véhicules en fonction de la demande réelle). Le raisonnement à l'échelle du service revient, outre à considérer le coût de l'automatisation de la flotte de véhicules et l'investissement de mise en œuvre, à déterminer le gain de fonctionnement du service global, dont en particulier la réduction des coûts de personnel par rapport à un service conventionnel avec conducteur.

En synthèse, les coûts pour l'exploitant sont calculés à partir du différentiel de coûts impliqués par l'automatisation d'une flotte de véhicules, et du dimensionnement des équipes d'intervention à distance et de terrain (supplémentaire) par rapport au dimensionnement d'une équipe de conducteurs, pour un même service rendu à l'utilisateur (desserte, fréquence).

1.2. Modèle de TCO : postes et inducteurs de coûts

Le modèle de différentiel de TCO se présente simplement, de façon générique, en notant $\Delta C_{\text{exploitant}} = \sum_i \Delta C_i$ où i désigne chaque poste de coût.

Ainsi, on a : $\Delta C_{\text{exploitant}} = \sum_{i,\text{conventionnel}} C_i - \sum_{i,\text{automatisation}} C_i (= \sum_i \Delta C_i)$ où i désigne chaque poste de dépense du service.

Dans la suite des travaux, par simplification, les coûts d'investissement ont été annualisés avec une période d'amortissement de 10 ans pour les systèmes d'automatisation et d'intervention à distance (NB : cette hypothèse revient à considérer que ces systèmes sont « sécables » des véhicules d'une part, des bâtiments de supervision à distance : seul leur surcoût est pris en compte – et annualisé sur 10 ans – dit autrement, les véhicules et les bâtiments, pour la partie hors automatisation et supervision à distance, restent amortis sur leur durée de vie propre). Une hypothèse d'amortissement sur 5 ans est par ailleurs testée, compte-tenu du phénomène d'obsolescence fonctionnelle rapide sur ces systèmes.

Les coûts se regroupent alors selon les principales familles présentées ci-dessous se distinguant par leurs inducteurs de coûts.

Poste de coût (annualisé)	Périmètre / remarque	Inducteur
Véhicule	<i>Les coûts propres aux véhicules sont supposés identiques entre la solution automatisée et non automatisée, la différence ne réside que dans le coût de l'automatisation (ci-dessous).</i>	
Système automatisé des véhicules	Logiciels d'automatisation, robotisation, capteurs, connectivité Dépend de la taille du véhicule, on distingue : <ul style="list-style-type: none"> • Véhicule de type M1 (type véhicule particulier ou navette urbaine) • Véhicule de type M2/M3 (type 12 m) : • Véhicule de type M2/M3 (type 18 m+) Les coûts se décomposent en des coûts d'investissement (amortis sur une période de référence) et des coûts de licence logicielle et d'abonnements de mise à jour.	Nombre de véhicules de
Mise en œuvre initiale du service	Le coût comporte : <ul style="list-style-type: none"> - le coût de l'homologation, - le coût de la démonstration de la sécurité - la mise en place de l'intervention à distance - la qualification de l'intervention à distance - les marches à blanc - le coût d'investissement de l'exploitation dont cartographie - le coût d'investissement de connectivité, d'infrastructure 	Fixe par service, un service comme une somme de dessertes dans un périmètre
Maintenance des véhicules	La maintenance est considérée en pourcentage du coût de véhicule, ce pourcentage est fixe selon que le véhicule est automatisé ou non ; le surcoût de maintenance des véhicules automatisés est donc mécaniquement supérieur à celui des véhicules conventionnels, à proportion du surcoût d'automatisation qui y est intégré. En sus, des coûts additionnels d'entretien en dépôt sont pris en compte (cf. ci-dessous).	Nombre de véhicules
Entretien spécifique en dépôt	Surcoût humain correspondant à : <ul style="list-style-type: none"> - la préparation des véhicules - le nettoyage des capteurs - les vérifications logicielles et matérielles - le parcours d'ouverture du service 	Nombre de véhicules
Intervention à distance	Le coût comporte les postes d'intervention ainsi que le coût des personnels postés. Le dimensionnement des besoins en personnel postés est établi selon deux approches : <ul style="list-style-type: none"> - approche forfaitaire : le nombre de véhicules « supervisables » par un humain posté est pré-défini (de 1 à 10 véhicules par superviseur) - approche modélisée : le nombre d'agents postés dépend de la fiabilité des systèmes automatisés (cf. point 1.4. ci-après détaillant le modèle statistique de dimensionnement des ressources d'intervention à distance et sur le terrain en fonction de la fiabilité des systèmes). 	Nombre de postes d'intervention, dépendant eux-mêmes du nombre de véhicules (et d'hypothèses de taux d'intervention ou du modèle de fiabilité)
Intervention sur le terrain	Ces coûts représentent les ressources humaines (chargées des coûts des moyens de transport et d'équipement) mobilisées lorsque l'intervention à distance ne suffit pas à résoudre une insuffisance fonctionnelle et doit déléguer une intervention humaine sur le lieu où l'insuffisance fonctionnelle a donné lieu à l'arrêt du véhicule. La durée d'une telle intervention (y compris déplacement), est paramétrée.	Nombre de véhicules (via les hypothèses de taux d'intervention ou du modèle de fiabilité)

Conduite à bord des véhicules	Ces coûts, évités lorsque le système est automatisé, consistent en le coût chargé des conducteurs de transports en communs.	Nombre de véhicules
Locaux d'intervention à distance	Ces coûts intègrent la composante liée à la surcharge locative liée à l'équipe d'intervention à distance supposée non mutualisable avec les équipes de supervision.	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance
Locaux d'intervention / terrain, de maintenance des véhicules	Le sur-coût appliqué aux locaux de maintenance et de l'équipe terrain est considéré marginal et nul dans le modèle (dépôt de maintenance et locaux des équipes terrain existants).	

Dans les hypothèses ci-dessus, un paramètre important réside dans le dimensionnement des ressources humaines nécessaires à tenir un emploi posté, pour tenir compte de l'amplitude du service et des règles de temps de travail. A ce stade, il a été considéré, pour une même amplitude du service en mode automatisé ou non automatisé, que trois emplois étaient nécessaires pour armer un poste de conduite, d'intervention à distance ou d'intervention terrain.

1.3. Hypothèses de coûts unitaires

Les principales hypothèses de coûts unitaires, issus des travaux prospectifs de l'éco-système, sont détaillées ci-dessous. Les valeurs utilisées dans l'évaluation principale sont **soulignées** ; lorsque des fourchettes sont données, les bornes de celles-ci sont utilisées respectivement pour évaluer une variante de TCO respectivement la plus favorable ou la plus défavorable aux systèmes automatisés (versus véhicules conventionnels).

Système automatisé des véhicules (investissement)	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicule M1 (VP) : 50 000 €⁴ • Véhicule M2 (y.c. navette) : 150 000 €
Amortissement (annualisation)	Amortissement sur 10 ans [variante : 5 ans] en annuités constantes, sans taux d'actualisation
Système automatisé des véhicules (licence, abonnement)	12 000 € / an
Mise en œuvre initiale du service	Coût fixe de mise en service : 300 000 €
Maintenance des véhicules	10% du coût du véhicule (et de son système automatisé)
Entretien spécifique en dépôt	1 h par jour et par véhicule au salaire horaire (chargé) = 1,0 * celui d'un conducteur
Intervention à distance	Poste de supervision = 10 000 € / an Salaire horaire (chargé) = 1,25 celui d'un conducteur Temps d'intervention = 3 mn
Intervention sur le terrain	Salaire horaire (chargé) = 1,5 * celui d'un conducteur en tenant compte de l'équipement et du déplacement Temps d'intervention = 30 mn
Conduite à bord des véhicules	Salaire annuel chargé d'un conducteur : 40 000 € /an
Locaux d'intervention à distance	Locaux d'intervention à distance = 5 000 € /an
Locaux de maintenance des véhicules	Hypothèse de mutualisation des locaux avec les équipes existantes

⁴ Cette hypothèse ne résulte pas des travaux de l'écosystème FVA-STPA, elle résulte de l'analyse de sources DGITM (présentées en bibliographie).

1.4. Modèle de dimensionnement de l'intervention à distance en fonction de la fiabilité

Le dimensionnement des équipes d'intervention à distance et terrain nécessaires est lié au fonctionnement des équipes respectivement à distance et sur le terrain vis-à-vis des insuffisances fonctionnelles des véhicules de la flotte. Autrement dit, le nombre d'opérateurs d'intervention à distance, respectivement d'opérateurs sur le terrain, dépend de la gestion des sollicitations des véhicules remontées.

Les hypothèses sont formulées ci-dessous :

La flotte est supervisée par une équipe d'intervention à distance, autrement dit, chaque opérateur est capable d'intervenir sur chaque véhicule, c'est le principe de mutualisation de l'effectif pour le service.

Toutes les insuffisances fonctionnelles donnant lieu à une sollicitation d'intervention à distance par le système automatisé d'un véhicule, sont remontées au centre d'intervention à distance, quelle que soit la capacité ou non d'intervention par un opérateur d'intervention à distance : le taux d'insuffisances fonctionnelles se décompose ainsi en un taux spécifique d'intervention à distance (dominant) et un taux nécessitant une intervention terrain (qui ne concerne qu'une sous-partie des insuffisances fonctionnelles). L'intervention à distance est ainsi en charge de réceptionner toutes les insuffisances fonctionnelles (sollicitations) des véhicules et d'en affecter une part à l'intervention terrain dans le cas où une action à distance ne suffit pas.

Chaque équipe d'intervention à distance comporte a minima deux agents, en application du principe de sécurité suivant : dès qu'un intervenant se consacre à traiter une insuffisance fonctionnelle sur un véhicule, il abandonne la supervision du reste de la flotte au profit du second agent. Si un second véhicule présente une insuffisance fonctionnelle pendant l'intervention sur le premier véhicule, alors, soit le service est interrompu le temps de traitement de l'insuffisance fonctionnelle du premier véhicule, soit l'équipe doit comporter un agent supplémentaire. Cette approche conduit donc à une forme d'arbitrage entre niveau de service et ressources d'intervention à distance : plus le nombre d'intervenants à distance est élevé, plus faible est la probabilité de devoir interrompre le service pour gérer plusieurs véhicules présentant simultanément des insuffisances fonctionnelles. Ceci a conduit à développer ci-après un modèle probabiliste, paramétré par les temps d'intervention respectivement à distance et sur le terrain.

Ceci conduit donc, avec ce modèle, à établir un lien entre le dimensionnement de l'équipe d'intervention à distance (ou terrain) et le niveau de fiabilité fonctionnelle du service (à distinguer de la fiabilité du système ADS de chaque véhicule). En comparaison à un service conventionnel, le niveau de fiabilité fonctionnelle désiré du service s'interprète comme la part (admise) du temps de service nominal pendant lequel les véhicules ne circulent pas.

Ainsi, le modèle proposé permet, à partir d'hypothèses sur le nombre de véhicules, le taux d'insuffisances fonctionnelles de leur système d'automatisation, le niveau de fiabilité fonctionnelle du service visé, de déterminer le nombre d'opérateurs d'intervention à distance nécessaires pour assurer ce niveau de fiabilité fonctionnelle, i.e. la part du temps d'exploitation nominale où la flotte doit être mise en arrêt momentané, tous les opérateurs étant sollicités en même temps sur des insuffisances fonctionnelles des véhicules. A partir de ce nombre d'intervenants calculé par le modèle, l'écart de TCO avec le service conventionnel est calculé

Dans l'approche proposée, l'intervention à distance est considérée comme une tâche spécifique avec des compétences spécifiques, ce qui est conforme au cadre réglementaire prévoyant une habilitation et une qualification spécifique. Cette hypothèse conduit à dire que la mutualisation des ressources d'intervention à distance avec des équipes de supervision de services non automatisés, n'est pas possible, en hypothèse de base.

Une approche comparable est retenue s'agissant des ressources d'intervention terrain selon que l'on considère les compétences comme « génériques » et mutualisables avec d'autres services nécessitant des interventions de terrain, ou comme spécifiques (= spécialisées, qualifiées). Pour les interventions de terrain, l'hypothèse centrale est que ces ressources sont spécifiques, ce qui empêche la mutualisation avec les équipes de terrain et de maintenance existantes, ce qui conduit à exprimer le besoin en nombre de personnes postées. Dans une variante, on considère ces compétences comme génériques donc mutualisables avec les équipes affectées à d'autres services. Dans ce cas, le besoin en agents d'intervention sur le terrain est exprimé en part d'équivalent temps plein.

En synthèse, les hypothèses relatives à la mutualisation des ressources sont posées ainsi :

Hypothèses centrales :

- Ressources d'intervention et de supervision à distance non mutualisables
- Ressources d'intervention sur le terrain non mutualisables

Variante : Ressources d'intervention sur le terrain mutualisables

Ainsi, en synthèse, le modèle permet de dimensionner le nombre d'opérateurs à distance en fonction de la taille de la flotte supervisée, en considérant que le système est opérationnel tant que le nombre de véhicules en insuffisance fonctionnelle (i.e. adressant une sollicitation à l'intervention à distance) est inférieur strictement au nombre d'opérateurs d'intervention à distance et que le service est suspendu dès lors que tous les opérateurs d'intervention à distance sont sollicités pour intervenir sur un véhicule de la flotte, c'est-à-dire que le nombre de véhicules en situation nécessitant une intervention à distance est égal au nombre d'opérateurs d'intervention à distance. Le taux acceptable de situations dans lequel le service doit être suspendu est paramétré : il s'interprète comme le niveau de service défini par l'exploitant et/ou l'organisateur de service. Une fois fixé (et en fonction des taux d'insuffisance fonctionnelle des systèmes automatisés), ce niveau de service permet de dimensionner le nombre d'opérateurs d'intervention à distance et, compte tenu d'hypothèses sur la part des insuffisances fonctionnelles nécessitant une intervention sur le terrain, le nombre d'agents de terrain nécessaires.

Le modèle repose donc fondamentalement sur la probabilité d'avoir un nombre de véhicules en panne parmi la flotte de véhicules égal au nombre d'opérateurs de l'intervention à distance, cette probabilité ne devant jamais dépasser le seuil qui se déduit (en tenant compte des temps d'intervention pour résoudre les insuffisances fonctionnelles) du niveau de service désiré par l'exploitant ou l'organisateur de service.

2. Résultats

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats obtenus pour les paramètres génériques présentés en 1.3. avec et sans mutualisation des locaux de l'intervention à distance et de maintenance. Les résultats sont présentés en écart (en pourcentage) par rapport au coût d'un service conventionnel en considérant une flotte de **10 véhicules et un parcours de 10 km**, au prix de base suivants :

- Véhicule M1 (VP) : **100 000 €**
- Véhicule M1/M2 (type navette) : **250 000 €**
- Véhicule M2/M3 - type 12 m : **500 000 €**
- Véhicule M2/M3 - type 18 m+ : **750 000 €**

2.1. Modèle simplifié : paramétrage du nombre de véhicules par intervenant

Les tableaux ci-dessous présentent les écarts de TCO entre un système automatisé et non automatisé selon le nombre de véhicules supervisés par intervenant à distance d'une part, le nombre de véhicules gérables par un intervenant de terrain d'autre part.

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisés pour des véhicules particuliers

Nombre de véhicules gérables par un intervenant de terrain ↓										
Nombre de véhicules supervisés par un intervenant à distance										
↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	172	112	91	81	75	71	68	66	65	63
2	117	56	36	26	20	16	13	11	9	8
3	98	38	17	7	1	-3	-6	-8	-10	-11
4	89	28	8	-2	-8	-12	-15	-17	-19	-20
5	83	23	3	-8	-14	-18	-21	-23	-24	-26
6	80	19	-1	-11	-17	-21	-24	-26	-28	-30
7	77	16	-4	-14	-20	-24	-27	-29	-31	-32
8	75	14	-6	-16	-22	-26	-29	-31	-33	-34
9	73	13	-7	-17	-24	-28	-30	-33	-34	-36
10	72	12	-9	-19	-25	-29	-32	-34	-36	-37

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé pour des navettes

Nombre de véhicules gérables par un intervenant de terrain ↓										
Nombre de véhicules supervisés par un intervenant à distance										
↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	155	104	87	79	74	70	68	66	65	64
2	108	58	41	33	28	24	22	20	19	17
3	93	42	26	17	12	9	6	5	3	2
4	85	35	18	10	4	1	-1	-3	-5	-6
5	81	30	13	5	0	-4	-6	-8	-9	-10
6	77	27	10	2	-3	-7	-9	-11	-12	-13
7	75	25	8	0	-5	-9	-11	-13	-14	-16
8	74	23	6	-2	-7	-10	-13	-15	-16	-17
9	72	22	5	-3	-8	-12	-14	-16	-17	-18
10	71	21	4	-4	-9	-13	-15	-17	-18	-20

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé pour des bus 12m

<i>Nombre de véhicules gérables par un intervenant de terrain ↓</i>										
<i>Nombre de véhicules supervisés par un intervenant à distance</i>										
↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	121	81	68	62	58	55	53	52	51	50
2	85	45	32	25	22	19	17	16	15	14
3	73	33	20	13	10	7	5	4	3	2
4	67	27	14	7	3	1	-1	-2	-4	-4
5	63	24	10	4	0	-3	-5	-6	-7	-8
6	61	21	8	1	-3	-5	-7	-8	-10	-10
7	59	19	6	0	-4	-7	-9	-10	-11	-12
8	58	18	5	-2	-6	-8	-10	-11	-13	-13
9	57	17	4	-3	-7	-9	-11	-12	-14	-14
10	56	16	3	-3	-7	-10	-12	-13	-14	-15

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé pour des véhicules 18 m+

<i>Nombre de véhicules gérables par un intervenant de terrain ↓</i>										
<i>Nombre de véhicules supervisés par un intervenant à distance</i>										
↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	99	67	56	51	47	45	44	42	42	41
2	69	37	26	21	18	16	14	13	12	11
3	60	27	16	11	8	6	4	3	2	1
4	55	22	11	6	3	1	-1	-2	-3	-4
5	52	19	9	3	0	-2	-4	-5	-6	-7
6	50	17	7	1	-2	-4	-6	-7	-8	-9
7	48	16	5	0	-3	-6	-7	-8	-9	-10
8	47	15	4	-1	-5	-7	-8	-9	-10	-11
9	46	14	3	-2	-5	-8	-9	-10	-11	-12
10	46	13	3	-3	-6	-8	-10	-11	-12	-12

2.2. **Modèle de dimensionnement de la supervision en fonction de la fiabilité**

Le modèle de dimensionnement des équipes d'intervention à distance repose sur la considération de deux paramètres :

- l'un propre à l'exploitation qui désigne le niveau de service, c'est-à-dire la part d'arrêt du système tolérée dans le temps d'exploitation ;
- l'autre propre aux performances des véhicules, qui désigne le taux d'insuffisances fonctionnelles, i.e. de sollicitations appelant une intervention extérieure au véhicule.

Chaque sollicitation remontée au centre d'intervention à distance est supposée traitée par un opérateur et requiert une durée moyenne fixe de son temps de travail, pendant laquelle il est totalement dédié au véhicule cible.

A partir des hypothèses formulées en 1.4., on cherche à déterminer le nombre d'opérateurs de l'équipe d'intervention à distance minimum pour superviser une flotte de véhicules avec un niveau de performances (lié aux taux horaires d'insuffisances fonctionnelles) fixé, en répondant aux objectifs de niveau de service de l'exploitation.

Pour rappel :

- le taux de sollicitations pouvant être traitées uniquement par l'intervention à distance est considéré comme majoritaire (= 95% en hypothèse centrale), le reste (5% en hypothèse centrale) nécessitant, en plus de l'intervention à distance, une intervention terrain ;
- le temps de décision dans l'affectation des sollicitations par le centre d'intervention à distance à un besoin d'intervention à distance ou terrain est considéré négligeable, autrement dit on ne considère que le temps réellement affecté à la réponse à la sollicitation.

On considère alors que le nombre d'opérateurs d'intervention à distance pour superviser une flotte de véhicules est fonction du jeu de paramètres :

[niveau de service, taux horaire d'insuffisances fonctionnelles, durée d'intervention]

répond à l'exigence suivante :

la probabilité d'avoir un nombre de véhicules en sollicitations en même temps correspondant au nombre d'opérateurs de l'équipe d'intervention à distance est inférieure au seuil défini par le niveau de service de l'exploitation.

La détermination de la loi de probabilité et le calcul de la probabilité associée sont présentés en annexe 1.

Les résultats tiennent compte des hypothèses relatives à la mutualisation des ressources (1.4.).

Pour le jeu d'hypothèses centrales :

- Ressources d'intervention et de supervision à distance non mutualisables
- **Ressources d'intervention sur le terrain non mutualisables**

Pour la variante :

- **Ressources d'intervention sur le terrain mutualisables**

Dans ce cas, le nombre d'opérateurs terrain est calculé directement à partir du taux horaire d'insuffisances fonctionnelles d'interventions terrain (5% du taux horaire global) et de la durée d'intervention terrain (30 min).

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé en fonction du nombre d'opérateurs d'intervention à distance et terrain pour chacune des typologies de véhicules considérées, calculés en fonction de la limite de service toléré et du taux d'insuffisances fonctionnelles pour les hypothèses centrales de durée d'intervention à distance = 3 min et terrain = 30 min pour une flotte de 10 véhicules de type navette

Limite de défaut de service tolérée (1-F)	Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	Nombre d'opérateurs d'intervention terrain	ΔTCO (%) Navette sans mutualisation	ΔTCO (%) Navette avec mutualisation				
10 ⁻⁴	1	4	3	+28%	+1%				
10 ⁻³		3	3	+19%	-9%				
10 ⁻²		2	2	+0%	-18%				
10 ⁻¹		2	1	-10%					
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	2	2	+0%	-10%				
10 ⁻³		2	1	-20%					
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻²	2	1			-10%	-20%		
10 ⁻³		2	1						
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻³	2	1					-10%	-20%
10 ⁻³		2	1						
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						

Les résultats obtenus pour les autres types de véhicules considérés dans l'analyse sont présentés en annexe 2.

Le tableau ci-dessous présente la synthèse des résultats obtenus pour les quatre types de véhicules considérés sans mutualisation des effectifs d'intervention terrain. Dans ce cas, le modèle probabiliste détermine le nombre d'opérateurs d'intervention à distance et le nombre d'opérateurs d'intervention terrain.

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé en fonction du nombre d'opérateurs d'intervention à distance et terrain pour chacune des typologies de véhicules considérées

Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	ΔTCO (%) Véhicule particulier	ΔTCO (%) Navette	ΔTCO (%) Bus 12 m	ΔTCO (%) Bus 18 m +
4 (et 3 opérateurs terrain)	+19%	+28%	+22%	+18%
3 (et 3 opérateurs terrain)	+9%	+19%	+15%	+12%
2 (et 2 opérateurs terrain)	-13%	+0%	+0%	+0%
2 (et 1 opérateur terrain)	-24%	-10%	-8%	-7%

Le tableau ci-dessous présente la synthèse des résultats obtenus pour les quatre types de véhicules considérés avec mutualisation des effectifs d'intervention terrain. Dans ce cas, le modèle probabiliste détermine le nombre d'opérateurs d'intervention à distance et le nombre d'intervention terrain est calculé comme la part d'effectif supplémentaire nécessaire directement par produit du taux d'insuffisances fonctionnelles terrain et de la durée d'intervention.

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé en fonction du taux d'insuffisances fonctionnelles, du nombre d'opérateurs d'intervention à distance pour chacune des typologies de véhicules considérés

Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	Δ TCO (%) Véhicule particulier	Δ TCO (%) Navette	Δ TCO (%) Bus 12 m	Δ TCO (%) Bus 18 m +
1	4	-12%	+1%	+1%	+0%
	3	-22%	-9%	-7%	-5%
	2	-33%	-18%	-14%	-11%
10^{-1}	2	-35%	-20%	-16%	-13%
10^{-2}	2	-35%	-20%	-16%	-13%
10^{-3}	2	-35%	-20%	-16%	-13%

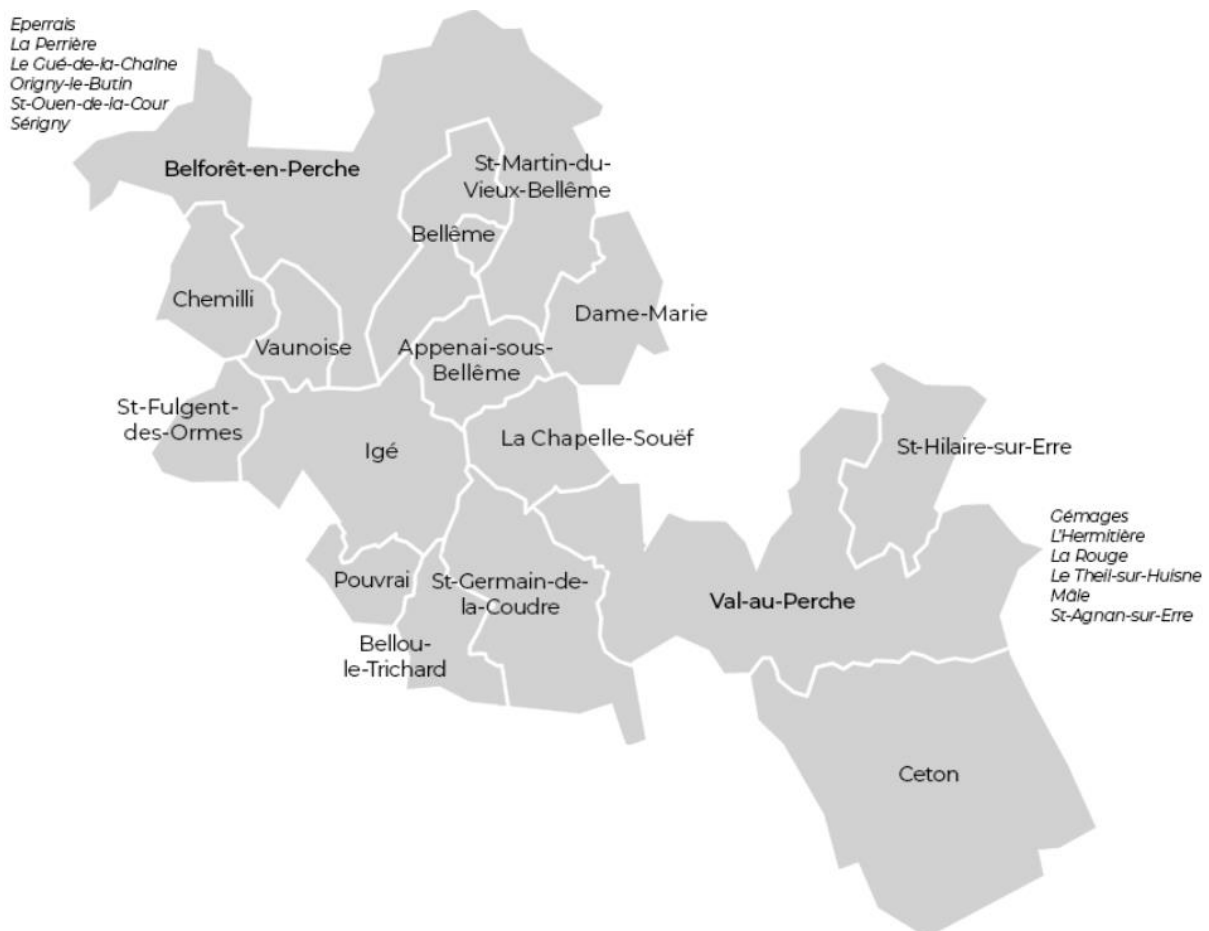
3. Application au cas stylisé inspiré du projet des Collines du Perche Normand

La communauté de communes des Collines du Perche Normand est composée de 16 communes et regroupe plus de 12000 habitants (chiffres INSEE 2019). Le territoire est situé au sud-est du département de l'Orne et de la Région Normandie, dans le Pays du Perche Ornaïs, à 1h30 de la région parisienne.

Le Perche Normand est au cœur des zones d'influence formées par les agglomérations du Mans (200000 habitants, 20 km à l'est), de Nogent-le-Rotrou (12000 habitants, 15 km au nord), de Mortagne-au-Perche (5 000 habitants, 15 km au nord) et La Ferté-Bernard (10 km à l'est).

La Communauté de Communes des Collines du Perche Normand est au cœur du Perche, région au patrimoine naturel préservé, qui forme un territoire plutôt rural. La majorité des communes se situent dans le territoire du Parc naturel régional du Perche, investi dans la préservation et la valorisation du patrimoine, qui donne une vocation touristique forte au territoire.

Figure 1 : Territoire de la communauté de communes des Collines du Perche Normand



La communauté de communes organise la mobilité de ses habitants et a publié en novembre 2024 un Plan de Mobilité Simplifié, fruit d'un processus structuré et collaboratif ayant abouti à un document opérationnel.

L'étude de ce territoire et de ses habitudes de mobilité constitue un cas concret de mise à l'épreuve du modèle économique présenté dans le document.

L'annexe 3 présente la synthèse du diagnostic de mobilité réalisé par la communauté de communes et publié en novembre 2024, sur lequel s'appuie cette analyse.

L'offre de mobilité proposée sur le territoire de la communauté de communes est la suivante. Le plan contient à la fois les offres du transport organisé par la région (notamment la région Normandie via le réseau Nomad) et l'offre du transport organisé par la communauté de communes, dit communautaire, identifié par un service de transport à la demande organisé en complément de l'offre du réseau Nomad.

La communauté de communes a plusieurs possibilités pour rendre son système de transport plus efficaces, par exemple :

- proposer l'automatisation d'une ligne de transport régulière sur son territoire ;
- créer deux lignes de transport supplémentaires exploitées avec des véhicules automatisés à vocation à relier les aires nord et sud (solution proposée par la stratégie de mobilité en réponse aux enjeux du territoire).

Dans le cas de l'automatisation **d'une ligne de transport régulière sur son territoire**, on considère le jeu d'hypothèses suivant pour **10 véhicules en circulation** :

Système automatisé des véhicules (investissement)	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicule M1 (VP) : 50 000 € Dont le prix du véhicule de base est fixé à 150 000 €
Système automatisé des véhicules (licences, abonnements)	12 000 €
Mise en œuvre initiale du service	300 000 €
Maintenance des véhicules	10% du coût du véhicule (et de son système automatisé)
Entretien spécifique en dépôt	1 h par jour et par véhicule au salaire horaire (chargé) = 1,0 * celui d'un conducteur
Intervention à distance	Poste de supervision = 10 000 € / an Salaire horaire (chargé) = 1,25 celui d'un conducteur Temps d'intervention = 3 mn
Intervention sur le terrain	Salaire horaire (chargé) = 1,5 celui d'un conducteur Temps d'intervention = 30 mn
Conduite à bord des véhicules	Salaire annuel chargé d'un conducteur : 40 000 €
Locaux d'intervention à distance	Locaux d'intervention à distance = 5 000 € /an
Locaux de maintenance des véhicules	Hypothèse de mutualisation des locaux

On considère le tableau obtenu en 2.2 en fonction des paramètres variables suivants :

- le niveau de service (fiabilité) attendu par l'exploitation (F) ;
- le taux horaire d'insuffisances fonctionnelles (solllicitations) (x) ;
- la part des insuffisances fonctionnelles d'intervention à distance fixée à 95%.

Limite de défaut de service tolérée (1-F)	Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	Nombre d'opérateurs d'intervention terrain	ΔTCO (%) VP sans mutualisation	ΔTCO (%) VP avec mutualisation				
10 ⁻⁴	1	4	3	+19%	-12%				
10 ⁻³		3	3	+9%	-22%				
10 ⁻²		2	2	-13%	-33%				
10 ⁻¹		2	1	-24%					
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	2	2	-13%	-24%				
10 ⁻³		2	1	-35%					
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻²	2	1			-24%			
10 ⁻³		2	1				-35%		
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻³	2	1					-24%	
10 ⁻³		2	1						-35%
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						

Dans le cas de l'automatisation **d'une nouvelle ligne de transport à la demande**, on considère cette fois un **véhicule de type navette**, toutes choses égales par ailleurs pour **10 véhicules en circulation** :

Limite de défaut de service tolérée (1-F)	Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	Nombre d'opérateurs d'intervention terrain	ΔTCO (%) Navette sans mutualisation	ΔTCO (%) Navette avec mutualisation				
10 ⁻⁴	1	4	3	+28%	+1%				
10 ⁻³		3	3	+19%	-9%				
10 ⁻²		2	2	+0%	-18%				
10 ⁻¹		2	1	-10%					
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	2	2	+0%	-10%				
10 ⁻³		2	1	-20%					
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻²	2	1			-10%			
10 ⁻³		2	1				-20%		
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻³	2	1					-10%	
10 ⁻³		2	1						-20%
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						

Annexe 1 : modèle de ressources d'intervention en fonction de la fiabilité des systèmes

La rentabilité économique est sensible aux paramètres suivants : (N_v, N_{iad}, N_t) , N_v étant une donnée d'entrée fixée par l'exploitant, N_{iad}, N_t étant déterminés par le taux de sollicitations en termes d'intervention à distance et terrain de chaque véhicule.

N_{iad} et N_t peuvent être considérés comme des données d'entrée, correspondant au dimensionnement des équipes d'intervention à distance et terrain dans l'optique d'obtenir la rentabilité économique. Une approche simplifiée ne tient en revanche pas compte d'éventuelles contraintes sur le système opéré, ni sur les limites de capacités des opérateurs eux-mêmes.

Cette partie s'intéresse ainsi à déterminer, par une approche statistique, le nombre d'opérateurs d'intervention à distance et le nombre d'opérateurs d'intervention terrain nécessaires en fonction des performances du système et en particulier du nombre de sollicitations horaires d'intervention de la flotte (à distance et terrain).

En d'autres termes, déterminer le nombre d'opérateurs d'intervention (à distance et terrain) en fonction du niveau de performances du système revient à déterminer le seuil de performance du système pour atteindre la rentabilité économique.

Nota bene : dans cette analyse, on ne s'intéresse pas aux aspects psychologiques liés à la notion de charge cognitive pour les opérateurs d'intervention à distance. Des études s'intéressant à la charge cognitive et au dépassement des capacités de réponse humaines montrent que la limite cognitive se trouve entre 5 et 9 véhicules opérés en même temps. On fera ainsi l'hypothèse que le modèle est réaliste dès lors que le nombre de véhicules par intervenant à distance ne dépasse pas ces seuils.

3.1. Détails de l'équation de coûts

L'équation du modèle de coûts traduisant la rentabilité économique d'un service de transport routier automatisé de personnes, par rapport à un service équivalent conventionnel (avec conducteurs) à partir des différentiels de coûts est la suivante :

$\Delta C_{exploitant} = \sum_i \Delta C_i$ où i désigne chaque poste de dépense différenciant.

Une autre approche équivalente aurait consisté à considérer l'ensemble des coûts de chaque service, et à déterminer le différentiel de coûts obtenus, approche privilégiée par la filière industrielle. Le recouplement des deux approches a été réalisé pour fiabiliser les résultats.

Dans ce cas, on a : $\Delta C_{exploitant} = \sum_{i,conventionnel} C_i - \sum_{i,automatisation} C_i$ ($= \sum_i \Delta C_i$) où i désigne chaque poste de dépense du service

Dans la suite des travaux, le raisonnement a été annualisé :

- les investissements sont indexés sur un taux d'investissement fixé ;
- les coûts de fonctionnement sont considérés par année d'activité (d'exploitation), hors coûts humains⁵ ;

⁵ Les surcoûts humains ne sont pas intégrés dans les coûts de fonctionnement pour des raisons de lisibilité des facteurs de coûts.

les coûts humains correspondant à la différence de coûts engendrés par la suppression des conducteurs et la création des postes d'opérateurs d'intervention à distance et de terrain.

En particulier, les coûts humains sont indexés sur le salaire annuel brut d'un conducteur, auquel est appliqué un ratio qui tient compte du niveau de qualification respectivement de l'opérateur d'intervention à distance et de l'opérateur terrain, par rapport au conducteur. En moyenne, il est considéré que :

- un opérateur d'intervention à distance a un niveau de qualification supérieur à celui d'un conducteur, notamment en raison de l'obligation de formations générale et particulière relatives au système exploité qui s'ajoute à l'obligation de détention du permis de conduire associé à la catégorie des véhicules opérés, définies par l'arrêté du 2 août 2022 relatif à l'habilitation de l'intervention à distance, donnant lieu à une rémunération supérieure à celle du conducteur ;
- un opérateur d'intervention terrain a une qualification comparable à légèrement supérieure à celle des techniciens de maintenance des centres d'exploitation, c'est-à-dire de rémunération inférieure à celle d'un conducteur ;
- une activité théorique de maintenance supplémentaire équivalent à 1 heure par jour et par véhicule, compte tenu des besoins de préparation des véhicules avant le démarrage du service est nécessaire ;
- le conducteur disparaît et représente un gain pour l'exploitation.

Alors, $\Delta C_{exploitant} = \Delta C_{investissement (invest)} + \Delta C_{fonctionnement (fonct)} + \Delta C_{humain (hum)}$

Dans la suite du document sont notés ΔC les différentiels de coûts relatifs à un poste de dépense (macro) et sont notés δC les différentiels de coûts unitaires (pour les véhicules notamment).

- $\Delta C_{invest} = \Delta C_{matériel roulant} + \Delta C_{mise en oeuvre}$
 $= d_i \cdot (N_v \cdot \delta C_{veh} + C_{mise en oeuvre})$ où d_i durée d'investissement

- $\Delta C_{fonct} = \Delta C_{maintenance^6} + \Delta C_{poste} + \Delta C_{divers}$
 $= N_v \cdot r_m \cdot \delta C_{veh} + N_{iad} \cdot C_{poste} + N_v \cdot C_{divers}$

où N_v nombre de véhicules, N_{iad} nombre d'opérateurs d'intervention à distance

- $\Delta C_{hum} = \Delta C_{cond} + \Delta C_{iad} + \Delta C_{terrain} + \Delta C_{activité supplémentaire}$

Les niveaux de rémunération des personnels d'intervention à distance et d'intervention terrain sont considérés comme étant un coût s'écrivant : $C_{op} = r_{op} \cdot C_{conducteur (cond)}$ où r_{op} ratio de qualification des opérateurs par rapport au conducteur.

Par ailleurs, on considère une activité théorique de maintenance supplémentaire à hauteur de 1 heure par jour et par véhicule, compte tenu des besoins de préparation des véhicules avant le démarrage du service. La mission de préparation du véhicule est aujourd'hui à la charge du

⁶ La maintenance des véhicules désigne la maintenance supplémentaire relative au système de conduite automatisé et aux capteurs des véhicules. En termes de coûts, elle est calculée comme étant le surcoût de maintenance et de mise à jour relative au surcoût du véhicule (porté par le système de conduite automatisée et les capteurs).

conducteur, correspondant à un niveau de rémunération équivalent à un conducteur. Par conséquent, il est considéré un surcoût horaire de maintenance par véhicule correspondant à : $C_{sup} = \frac{1}{T_j} \cdot C_{cond}$ où T_j temps de travail journalier d'un opérateur.

Enfin, le dimensionnement des équipes humaines est fonction du ratio entre le temps total d'exploitation journalier et de la durée du temps de travail d'un poste humain. On introduit ainsi α ($\alpha > 1$) comme le nombre d'humains (équivalents temps pleins) nécessaires par véhicule (ou par poste) sur la durée totale d'exploitation journalière.

Donc on a :

$$\Delta C_{hum} = \alpha \left[-N_v \cdot C_{cond} + N_{iad} \cdot r_{iad} \cdot C_{cond} + N_t \cdot r_t \cdot C_{cond} + N_v \cdot \frac{1}{T_j} \cdot C_{cond} \right]$$

où N_v nombre de véhicules, N_{iad} nombre d'opérateurs d'intervention à distance, N_t nombre d'opérateurs terrain.

Sensibilité au nombre d'opérateurs du service (intervention à distance et terrain)

Dans cette équation, il apparaît deux variables : N_{iad} et N_t .

La première approche consiste à déterminer le couple (N_{iad}, N_t) qui permet d'obtenir l'équilibre économique a minima, la rentabilité économique au mieux.

On considère que $N_{iad} = \frac{N_v}{N_{iad,u}}$ et $N_t = \frac{N_v}{N_{t,u}}$ où $N_{iad,u}, N_{t,u}$ le nombre de véhicules à la charge respectivement d'un opérateur d'intervention à distance et d'un opérateur terrain.

La détermination du couple (N_{iad}, N_t) dépend en réalité du couple $(N_{iad,u}, N_{t,u})$.

Sensibilité à la taille de la flotte

Ce qui n'apparaît pas directement dans les résultats est la sensibilité au nombre de véhicules de la flotte, qui a du sens lorsque l'on s'intéresse à la comparaison entre cas d'usage, caractérisés par des tailles de flottes différentes.

Bien qu'à l'échelle d'un service, la taille de la flotte est fixée, déterminer les cas d'usage qui auront la meilleure rentabilité économique est un enjeu de marché.

En effet, l'équilibre économique est obtenu pour $\Delta C_{exploitant} < 0$ soit lorsque :

$$d_i \cdot (N_v \cdot \delta C_{veh} + C_{mise\ en\ oeuvre}) + N_v \cdot r_m \cdot \delta C_{veh} + N_{iad} \cdot C_{poste} + N_v \cdot C_{divers} \\ + \alpha [N_{iad} \cdot r_{iad} \cdot C_{cond} + N_t \cdot r_t \cdot C_{cond}] + N_v \cdot \frac{1}{T_j} \cdot C_{cond} < \alpha \cdot N_v \cdot C_{cond}$$

Dans l'équation ci-dessus, sont identifiés en bleu les facteurs de coûts les plus dimensionnants, correspondant aux postes de dépenses correspondant à l'intervention à distance et terrain pour l'automatisation et au poste de conducteur dans l'autre.

En simplifiant, la rentabilité économique est majoritairement dépendante de la balance entre les deux termes $(N_{iad} \cdot r_{iad} \cdot C_{cond} + N_t \cdot r_t \cdot C_{cond}, N_v \cdot C_{cond})$.

En considérant que $r_{iad} \cdot C_{cond} \approx r_t \cdot C_{cond} \approx C_{cond}$ à l'échelle de l'équation globale, la balance repose en partie sur le couple $(N_{iad} + N_t, N_v)$, soit sur le couple $(N_{iad,u} + N_{t,u}, N_v)$.

En d'autres termes, le nombre de véhicules de la flotte a une incidence sur la rentabilité du service par rapport à un service conventionnel et le service sera d'autant plus rentable que $N_{iad} + N_t \ll N_v$.

De ces premiers résultats, il apparaît que le triplet (N_v, N_{iad}, N_t) est dimensionnant dans l'équation de coûts.

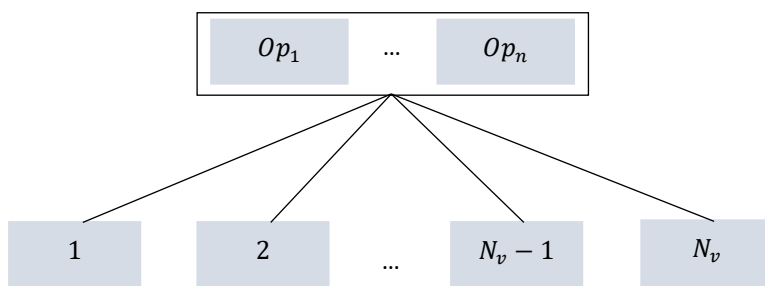
3.2. Hypothèses induites du cadre réglementaire

La modélisation mathématique nécessite de définir les hypothèses de travail et en particulier les hypothèses relatives à la conception de l'équipe d'opérateurs d'intervention à distance dans la gestion d'une flotte de véhicules.

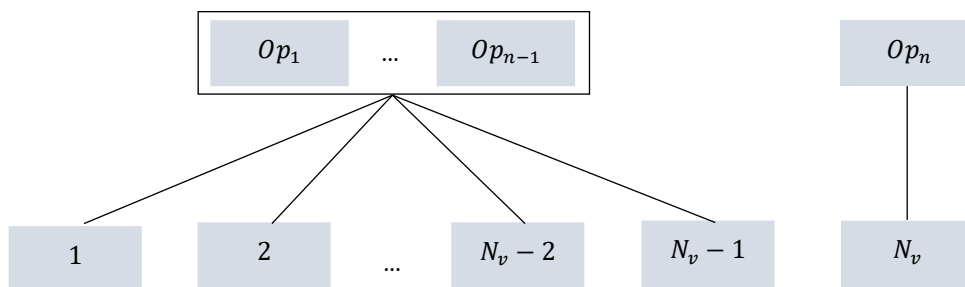
Soit une flotte de N_v véhicules, opérée par N_{iad} opérateurs d'intervention à distance.

L'ordonnance n° 2021-443 du 14 avril 2021 prévoit que toute personne habilitée à effectuer des missions d'intervention à distance, est pénalement responsable de ses interventions ou de son absence d'intervention, en particulier des infractions résultat d'une manœuvre du véhicule.

Le principe selon lequel une équipe d'opérateurs d'intervention à distance intervient sur une flotte est le suivant : les intervenants à distance agissent en équipe sur l'ensemble de la flotte.

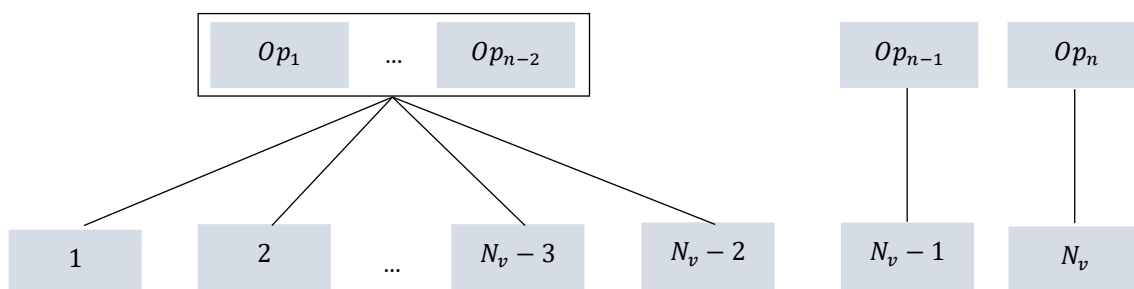


Lorsqu'un intervenant à distance est sollicité par un des véhicules, le schéma devient :



On a alors $N_v - 1$ véhicules, opérée par $N_{op,r} - 1$ opérateurs d'intervention à distance.

Si un deuxième intervenant à distance est sollicité par un autre véhicule, on a alors :



On a alors $N_v - 2$ véhicules, opérée par $N_{op,r} - 2$ opérateurs d'intervention à distance.

Le système fonctionne jusqu'à un seuil critique obtenu lorsque le nombre de véhicules en sollicitations dépasse le nombre d'opérateurs d'intervention à distance.

Déterminer le nombre d'opérateurs d'intervention à distance revient ainsi à chercher la probabilité d'avoir plus de N_{iad} véhicules en sollicitations parmi les N_v véhicules de la flotte.

On considère de plus deux hypothèses :

- le nombre d'opérateurs d'intervention à distance est inférieur (ou égal) au nombre de véhicules de la flotte et ne peut être inférieur à 2 ;
- l'exploitant définit un taux de fiabilité du système, c'est-à-dire le taux d'arrêt complet du système pendant l'exploitation, atteint lorsque tous les opérateurs d'intervention à distance sont sollicités par un véhicule.

Nota bene relatif au nombre limite d'opérateurs d'intervention à distance :

- l'arrêté du 2 août 2022 relatif à l'habilitation de l'intervention à distance prévoit l'existence d'un opérateur d'intervention à distance et d'un encadrant, l'équipe se composant a minima de deux équivalents temps plein ;
- le principe de fonctionnement de l'équipe décrit plus haut n'est valable que pour un nombre minimal d'opérateurs égal à 2.

Le lien avec l'équipe d'intervention terrain est le suivant :

- un opérateur d'intervention terrain ne peut intervenir sur un véhicule qu'après une sollicitation d'un opérateur d'intervention à distance ;
- un opérateur d'intervention à distance sollicite un intervention terrain lorsqu'il est dans l'incapacité de répondre à la sollicitation du véhicule depuis son poste à distance⁷ ;
- si on note x le taux de sollicitation d'un véhicule (vers l'intervention à distance), alors $x = x_{iad} + x_t$, où x_{iad} sollicitation d'intervention à distance et x_t sollicitation d'intervention terrain ;
- on considère que $x_{iad} \gg x_t \geq 1$.

⁷ Par ailleurs on considère comme négligeable le temps d'affectation d'une sollicitation à l'opérateur d'intervention terrain.

3.3. Détermination du nombre d'opérateur d'intervention à distance et terrain

On cherche ici le nombre d'intervenants à distance N_{iad} nécessaires pour une flotte de N_v véhicules⁸.

La détermination du nombre d'intervention à distance (et du nombre d'intervention terrain) détermine la rentabilité économique du service automatisé par rapport à un service conventionnel.

Soit x_{iad} le taux de sollicitations⁹ horaire d'un véhicule.

On considère X la variable aléatoire qui à chaque véhicule associe son état (en sollicitation ou non). La variable X suit la loi de Bernoulli de probabilité x telle que : $\mathbb{P}(X = n) = \begin{cases} x_t & \text{si } n = 1 \\ 1 - x_t & \text{si } n = 0 \end{cases}$

Soit N le nombre de véhicules à la charge d'un intervenant à distance tel que $N = \frac{N_v}{N_{iad}}$.

On raisonne à l'échelle du service, ce qui signifie que les intervenants à distance ne sont pas affectés à une partie de la flotte mais qu'ils sont mutualisés pour la flotte. Par ailleurs, chaque sollicitation d'un véhicule monopolise le temps (charge cognitive) de l'intervenant à distance qui répond à celle-ci : on a alors $N_v - 1$ véhicules à la charge de $N_{iad} - 1$ intervenants à distance.

On introduit la durée moyenne d'une intervention sur un véhicule d_{iad} .

Soit Y la variable aléatoire suivant une loi binomiale $B(N_v, x_{iad} \cdot d_{iad})$.

Alors la probabilité d'avoir k véhicules en sollicitation parmi les N_v véhicules de la flotte pendant une période d_{iad} s'écrit :

$$\forall k \in [0 ; N_v], \mathbb{P}(Y = k) = \binom{N_v}{k} \cdot (x_{iad} \cdot d_{iad})^k \cdot (1 - x_{iad} \cdot d_{iad})^{N_v - k}$$

Alors le nombre moyen de sollicitations par véhicule pendant la période de temps d_{iad} est proportionnelle à d_{iad} et s'écrit $x_{iad} \cdot d_{iad}$.

La loi de probabilité discrète décrivant le comportement du nombre d'événements rares et indépendants se produisant dans un intervalle de temps fixé petit, en cherchant à augmenter le nombre de véhicules de la flotte, on approxime la loi binomiale par une loi de Poisson de paramètre $\lambda = N_v \cdot x_{iad} \cdot d_{iad}$.

La loi de probabilité s'écrit : $\forall k \in [0 ; N_v], \mathbb{P}(Y = k) = e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!}$

Ainsi, on s'intéresse à la probabilité d'avoir N_{iad} véhicules qui sollicitent une intervention à distance pendant d_{iad} , en considérant que lorsque tous les opérateurs d'intervention à distance interviennent sur un véhicule de la flotte, le système s'arrête : il n'y a plus aucune intervention à distance possible sur aucun autre véhicule de la flotte.

⁸ Le raisonnement est le même pour déterminer le nombre d'opérateurs terrain nécessaires (lien à l'hypothèse **H7.b.** décrite en 1.4.).

⁹ On considère ici « sollicitation » comme toute intervention d'un opérateur d'intervention à distance sur un véhicule, conformément au cadre réglementaire, et non uniquement aux sollicitations stricto sensu du véhicule à l'intervention à distance. x_{iad} correspond aux performances du système.

On cherche donc à déterminer la probabilité d'avoir un nombre de véhicules en sollicitations en même temps supérieur à la limite du nombre d'opérateurs d'intervention à distance : soit $\mathbb{P}(X \geq N_{iad})$.

On cherche alors $\mathbb{P}(X \geq N_{iad}) = \sum_{k=N_{iad}}^{N_v} (e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^k}{k!})$.

La probabilité que le système s'arrête est régie par le niveau de service fixé par l'exploitant noté F tel que $\mathbb{P}(X \geq N_{iad}) \leq 1 - F$.

Alors N_{iad} est obtenu par récursivité en partant de N_v (somme des $P(X = k)$ en partant de N_v jusqu'à ce que $\sum_{k=N_{iad}}^{N_v} \mathbb{P}(X = k) > 1 - F$).

Dans ce modèle, le nombre d'intervenants à distance est fonction de (N_v, x_{iad}, x_t) .

Sensibilité au niveau de service désiré

Le tableau suivant présente le niveau de service limite pour lequel l'équipe d'intervention à distance est minimale (soit 2 opérateurs) en fonction du taux d'insuffisances fonctionnelles (x).

x	Solution centrale	Jeu d'hypothèses défavorables	Jeu d'hypothèses favorables
0.1	> 0.999	> 0.999	> 0.999
0.2	> 0.999	> 0.999	> 0.999
0.5	0.998	0.993	> 0.999
0.8	0.994	0.978	> 0.999
0.9	0.992	0.970	> 0.999
1.0	0.990	0.960	> 0.999

Sensibilité au taux d'insuffisances fonctionnelles

Le tableau ci-dessous présente le taux d'insuffisances fonctionnelles (sollicitations) limite pour lequel l'équipe d'intervention à distance est minimale (soit 2 opérateurs) en fonction du niveau de service (F).

F	Solution centrale	Jeu d'hypothèses défavorables	Jeu d'hypothèses favorables
0.9999	0.20	0.12	0.60
0.999	0.44	0.26	1.32
0.99	1.00	0.60	3.00
0.9	2.43	1.46	7.32

Annexe 2 : résultats obtenus pour les typologies de véhicules considérées (hors navette)

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé en fonction du nombre d'opérateurs d'intervention à distance et terrain pour chacune des typologies de véhicules considérées, calculés en fonction de la limite de service toléré et du taux d'insuffisances fonctionnelles pour les hypothèses centrales de durée d'intervention à distance = 3 min et terrain = 30 min pour une flotte de 10 véhicules de type véhicule particulier

Limite de défaut de service tolérée (1-F)	Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	Nombre d'opérateurs d'intervention terrain	ΔTCO (%) VP sans mutualisation	ΔTCO (%) VP avec mutualisation				
10 ⁻⁴	1	4	3	+19%	-12%				
10 ⁻³		3	3	+9%	-22%				
10 ⁻²		2	2	-13%	-33%				
10 ⁻¹		2	1	-24%					
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	2	2	-13%	-24%				
10 ⁻³		2	1	-35%					
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻²	2	1			-24%			
10 ⁻³		2	1				-35%		
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻³	2	1					-24%	
10 ⁻³		2	1						-35%
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé en fonction du nombre d'opérateurs d'intervention à distance et terrain pour chacune des typologies de véhicules considérées, calculés en fonction de la limite de service toléré et du taux d'insuffisances fonctionnelles pour les hypothèses centrales de durée d'intervention à distance = 3 min et terrain = 30 min pour une flotte de 10 véhicules de type bus 12 m

Limite de défaut de service tolérée (1-F)	Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles	Nombre d'opérateurs d'intervention à distance	Nombre d'opérateurs d'intervention terrain	ΔTCO (%) Bus 12 m sans mutualisation	ΔTCO (%) Bus 12 m avec mutualisation				
10 ⁻⁴	1	4	3	+22%	+1%				
10 ⁻³		3	3	+15%	-7%				
10 ⁻²		2	2	+0%	-14%				
10 ⁻¹		2	1	-8%					
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	2	2	+0%	-8%				
10 ⁻³		2	1	-16%					
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻²	2	1			-8%			
10 ⁻³		2	1				-16%		
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻³	2	1					-8%	
10 ⁻³		2	1						-16%
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						

Ecart de TCO (en %) entre service automatisé et non automatisé en fonction du nombre d'opérateurs d'intervention à distance et terrain pour chacune des typologies de véhicules considérées, calculés en fonction de la limite de service toléré et du taux d'insuffisances fonctionnelles pour les hypothèses centrales de durée d'intervention à distance = 3 min et terrain = 30 min pour une flotte de 10 véhicules de type bus 18 m et plus

<i>Limite de défaut de service tolérée (1-F)</i>	<i>Taux horaire d'insuffisances fonctionnelles</i>	<i>Nombre d'opérateurs d'intervention à distance</i>	<i>Nombre d'opérateurs d'intervention terrain</i>	<i>ΔTCO (%) Bus 18 m sans mutualisation</i>	<i>ΔTCO (%) Bus 18 m avec mutualisation</i>				
10 ⁻⁴	1	4	3	+18%	+0%				
10 ⁻³		3	3	+12%	-5%				
10 ⁻²		2	2	+0%	-11%				
10 ⁻¹		2	1	-7%					
10 ⁻⁴	10 ⁻¹	2	2	+0%	-7%				
10 ⁻³		2	1	-13%					
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻²	2	1			-7%	-13%		
10 ⁻³		2	1						
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						
10 ⁻⁴	10 ⁻³	2	1					-7%	-13%
10 ⁻³		2	1						
10 ⁻²		2	1						
10 ⁻¹		2	1						

Annexe 3 : description et représentation stylisée du cas du Perche Normand

En devenant autorité organisatrice de la mobilité sur son territoire en juillet 2021, la communauté de communes a engagé une démarche volontaire pour produire un document global de planification des mobilités, qui constitue une feuille de route opérationnelle en matière de mobilité à l'échelle du territoire, en adéquation avec les finances locales et les préoccupations écologiques et sociales de son territoire.

La démarche a été initiée en janvier 2023 avec la réalisation d'un diagnostic des mobilités du territoire, permettant de formaliser les enjeux du territoire ainsi que la stratégie de mobilité associée à ces enjeux. La mise en œuvre opérationnelle a été lancée en mars 2024.

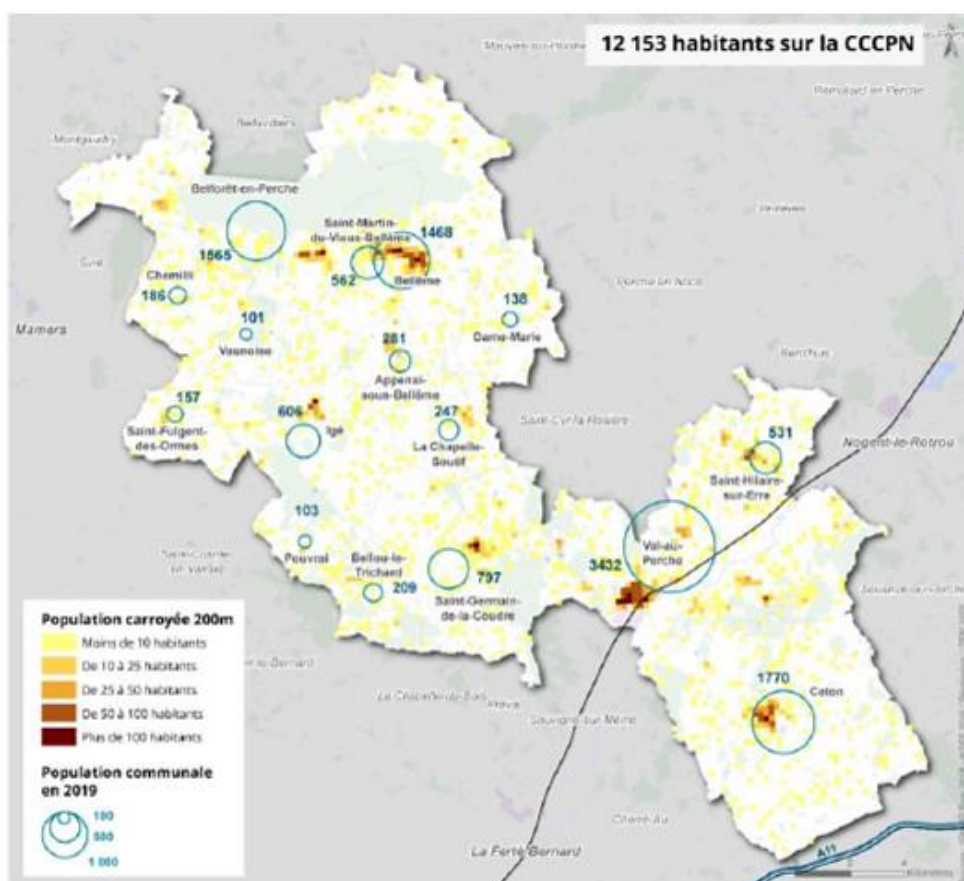
a) Diagnostic de mobilité

Deux enquêtes qualitatives ont été réalisées pour identifier les besoins et les attentes des habitants en termes de mobilité :

- un questionnaire auprès des habitants de la communauté de communes (2.7 % de la population répartis sur les 16 communes) ;
- un questionnaire auprès des communes (toutes les communes ont identifié leurs besoins et attentes).

La communauté de communes est à l'interface de trois régions, dont trois autorités organisatrices de la mobilité régionales : Normandie, Pays-de-la-Loire et Centre-Val-de-Loire, caractérisées par trois départements.

Figure 2 : Structuration du territoire autour de la répartition de sa population



Les distances parcourues par les flux d'actifs intercommunaux sont en majorité de quelques kilomètres (3 à 10 km) entre les pôles principaux et secondaires.

En comparaison, les déplacements domicile-travail sont aujourd'hui réalisés en voiture en majorité :

- 79% pour les actifs travaillant dans leur commune de résidence (17 % à pied) ;
- 98 % pour les actifs travaillant dans une autre commune ;
- 96% pour les actifs sortants de la communauté de communes (la part de l'utilisation des transports publics représente plus de 30% vers la région parisienne et Le Mans) ;
- 99% des actifs entrant sur le territoire.

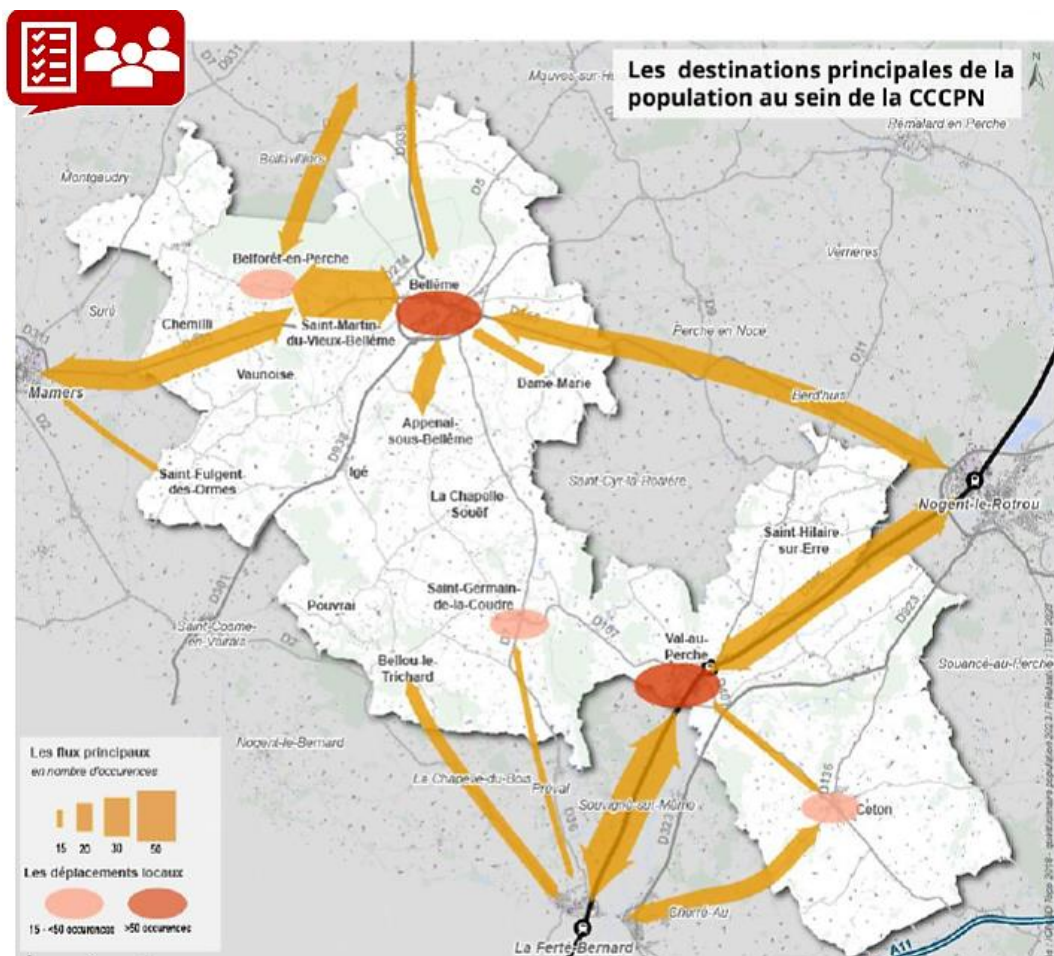


Figure 4 : Principaux flux de déplacement au sein de la communauté de communes

Outre les déplacements domicile-travail, les flux identifiés traduisent l'importance des pôles externes : Nogent-le-Rotrou et La Ferté-Bernard, puis Mamers et Mortagne-au-Perche en ce qui concerne des motifs variables : achats de base et grandes surfaces, loisirs, sport, culture et santé.

L'analyse des axes du trafic routier montre une aisance à se déplacer en voiture et n'incite pas au report modal : des axes structurants avec des alternatives gratuites à l'autoroute A11, des axes secondaires empruntés, et un trafic poids lourd non négligeable sur certains axes.

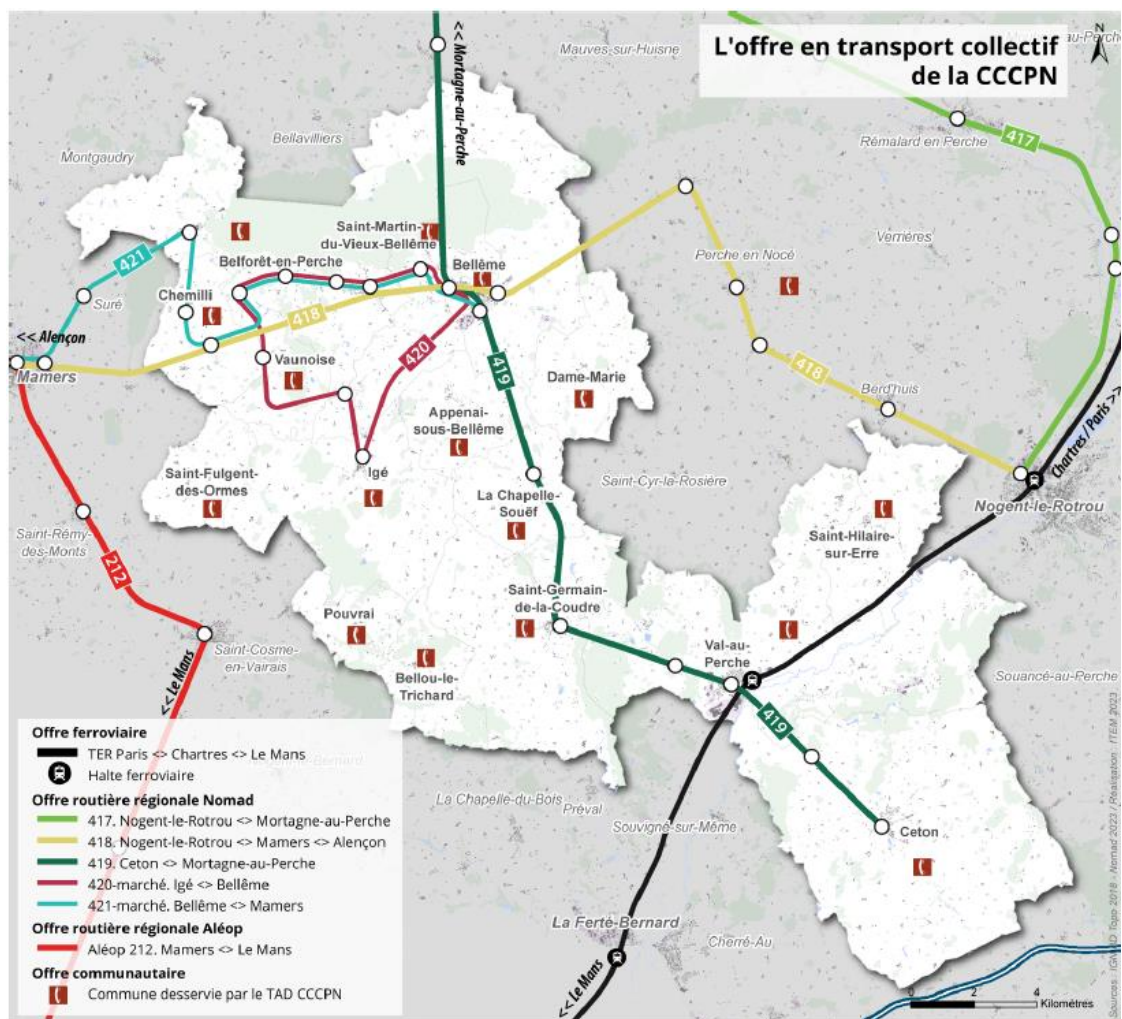
Globalement, le trafic pourrait être qualifié de modéré (en rapport à la capacité des axes routiers), mais certains élus considèrent un trafic élevé et des vitesses de circulation élevées.

L'offre de transports en commun est constituée de trois offres sur le territoire de la communauté de communes :

- la ligne ferroviaire Paris – Chartres – Le Mans (TER) qui comporte une gare sur le territoire (Le Theil) et deux gares à proximité (Nogent-le-Rotrou et La Ferté-Bernard) ;
- des lignes de car régionales du réseau Nomad (Région Normandie) : 2 lignes régulières (418 et 419) et deux lignes à la demande (420 et 421) ;
- un service de transport à la demande sur toutes les communes de la communauté de communes.

Deux autres lignes régulières régionales à proximité du territoire : 417 (Normandie) et 212 (Pays-de-la-Loire).

Figure 5 : Offre de transports en commun sur ou à proximité du territoire



Globalement, dans le cadre de l'enquête, l'offre de transports en commun a été qualifiée par une faible attractivité pour les actifs, bonne à très bonne en moyenne pour les captifs.

Le tableau suivant présente les résultats du diagnostic réalisé sur le territoire.

Ligne	Autorité organisatrice	Période	Communes desservies	Nombre de services	Adéquation offre / demande
Le Mans <> Chartres <> Paris Montparnasse		Tous les jours 7h – 21h	Val-au-Perche (Le Theil)	17 Aller-Retour en semaine 8 le samedi 7 le dimanche	Vers Nogent-le-Rotrou et La Ferté-Bernard Limitée pour les actifs Moyenne pour les captifs
					Vers Le Mans / Chartres et l'île de France Moyenne pour les actifs Moyenne à Bonne pour les captifs Des niveaux de desserte plus attractifs depuis les gares voisines
418. Nogent <> Mamers <> Alençon	Région Normandie	Lun. au Ven. toute l'année	3 communes Bellême, Belforêt-en-Perche (Le Gué-de-la-Chaine et Sérigny), Chemilli	9 services	Faible pour les actifs Bonne pour les captifs selon les destinations
419. Ceton <> Mortagne-au-Perche	Région Normandie	Lun. au Ven. en période scolaire	7 communes Ceton, Val-au-Perche (Le Theil), Saint-Germain-de-la-Coudre, La Chapelle-Souëf, Igé, Belforêt-en-Perche (Le Gué-de-la-Chaine), Bellême	1 aller le matin 2 retours en fin d'après-midi	Très faible pour les actifs et les captifs
420. Igé <> Bellême (TAD Marché)	Région Normandie	Le Jeu. toute l'année	5 communes Igé, Vauvoise, Belforêt-en-Perche (Sérigny, Origny-le-Butin, Le Gué-de-la-Chaine), Saint-Martin-du-Vieux-Bellême, Bellême	1 aller-retour le matin	Très bonne pour les captifs
421. Bellême <> Mamers (TAD Marché)	Région Normandie	Le Lun. toute l'année	4 communes Bellême, Saint-Martin-du-Vieux-Bellême, Belforêt-en-Perche (Sérigny, Origny-le-Butin, Le Gué-de-la-Chaine, La Perrière), Chemilli	1 aller-retour le matin	Bonne pour les captifs
417. Nogent <> Mortagne <> Alençon	Région Normandie	Lun. au Sam. toute l'année	aucune	10 services / 4 services le samedi	Très faible pour les actifs et les captifs
212. Mamers <> Le Mans	Région Pays de la Loire	Lun. au Sam. toute l'année	aucune	8 services / 4 services le samedi	Bonne pour les actifs Moyenne pour les captifs

En complément, le territoire dispose d'une offre de transports scolaires répartie en 19 lignes, réservées au transport scolaire sauf sur demande préalable. Parmi les répondants, les parents estiment être satisfaits à 43% par l'offre existante, tandis que 30% considèrent que les horaires sont inadaptés, 13% que la sécurité aux arrêts est insuffisante. Le transport scolaire présente un enjeu de sécurisation aux arrêts.

Le territoire bénéficie de l'offre de transport régionale (réseau Nomad) et d'autres offres régionales à proximité du territoire. La communauté de communes est organisatrice de la mobilité en complément sur son territoire et organise depuis 2017 un transport à la demande (et sur la commune de Perche-en-Nocé).

Le transport à la demande est assuré par un artisan taxi, la communauté de communes organise le suivi et la réservation. L'offre est ouverte à tous les habitants du périmètre du territoire pour assurer les déplacements ciblés par la communauté de communes.

La tarification appliquée, en dehors des motifs de déplacement vers les services de la communauté de commune, est complexe et dépend de la distance parcourue et du motif du déplacement. Par exemple, un trajet vers une gare sera facturé selon la distance par paliers de 5€ quand un rabatement vers une correspondance bus sera facturé 2.5€.

En termes d'aménagements, deux arrêts de transport public peuvent être qualifiés de pôle d'échange sur le territoire : la gare de Le Theil – La rouge et la place du champ de foire à Bellême, équipés d'aires de stationnement ou de covoiturage. Plus généralement, le territoire comprend trois aires de covoiturage signalées et trois parkings servant de covoiturage.

Des initiatives d'autopartage sont aussi implantées sur le territoire dont une par un acteur privé, une par le département de l'Orne et une dans la commune de Bellême.

En ce qui concerne finalement les mobilités douces et les itinéraires cyclables, le territoire ne dispose d'aucun aménagement cyclable.

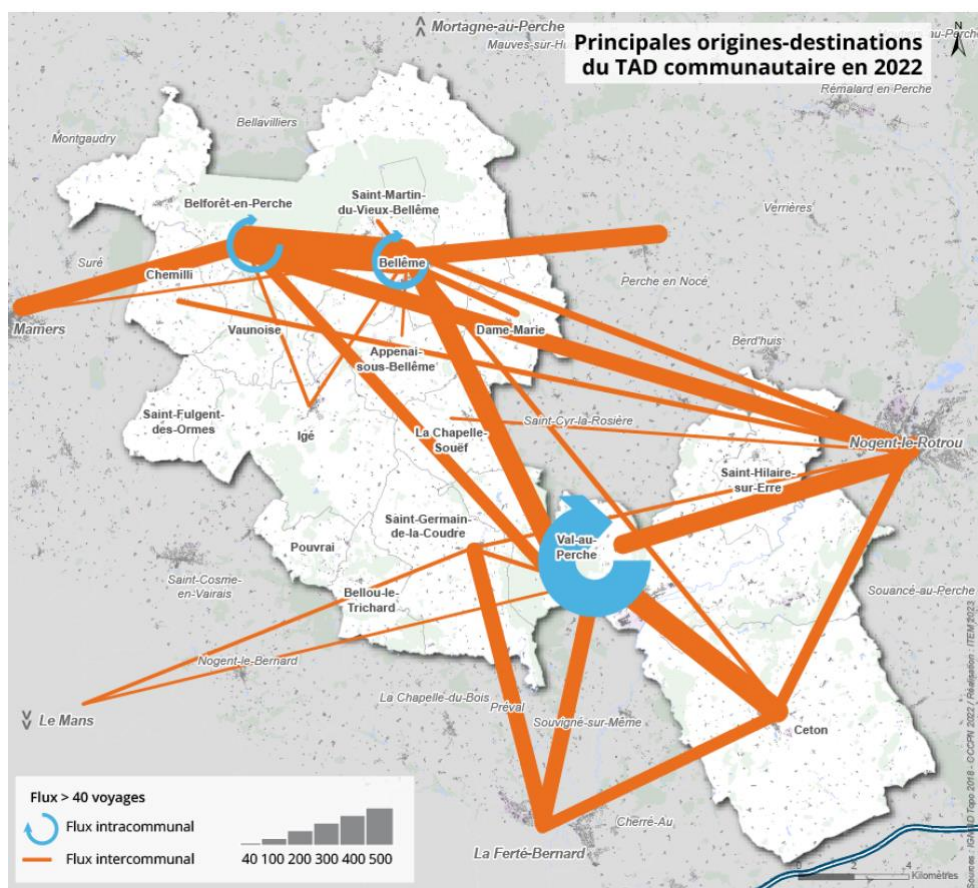


Figure 6 : Principales origines-destinations du transport à la demande organisé par la communauté de communes

b) Stratégie de mobilité impliquant la mobilité routière automatisée

Le diagnostic réalisé par la communauté de communes des Collines du Perche Normand a permis d'initier des temps d'échange visant à construire une stratégie de mobilité adaptée aux besoins et enjeux du territoire. Les temps d'échange ont regroupé des élus, des techniciens, des partenaires, des acteurs locaux, des associations et des habitants.

Le plan d'action contient 13 actions regroupées autour de quatre axes majeurs : les transports collectifs, le développement du vélo, la diminution de l'autosolisme et l'information et la solidarité.

L'axe 1 dédié aux transports collectifs contient 5 actions dont l'une :

1.4 Réaliser une étude d'opportunité de création de nouvelles lignes internes / navette autonome en complément du TAD communautaire.

Une action transversale est la question du financement des nouveaux services de transports collectifs.

Cette action est présentée comme une action à court terme ciblée pour les actifs, les captifs et les scolaires devant répondre à l'objectif de faire des lignes de transport en commun une alternative à la voiture pour se déplacer sur la communauté de communes.

Le diagnostic a mis en évidence que :

- l'offre de transport en commun régulière est insuffisante pour se déplacer en interne sur le territoire ;
- l'offre de transport à la demande communautaire n'est pas conçue pour répondre aux besoins des déplacements quotidiens.

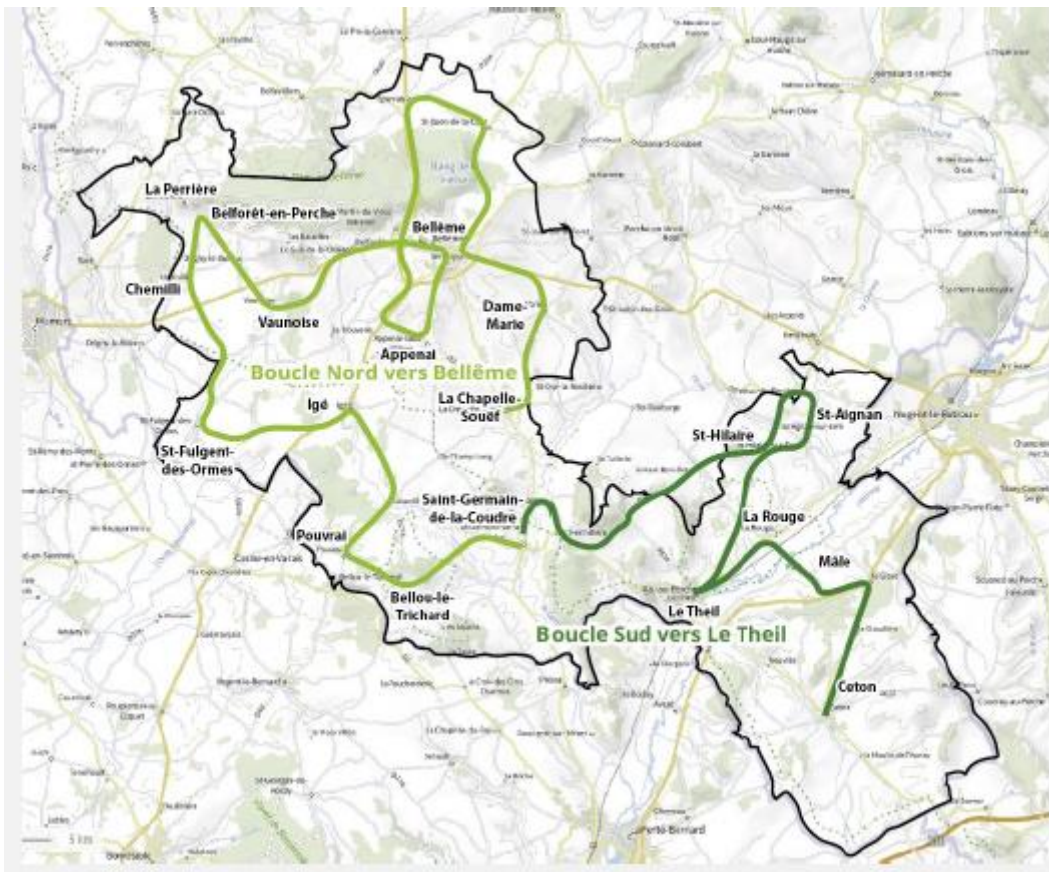
Pour répondre à l'objectif d'attractivité des transports en commun, trois mesures sont présentées dont l'étude d'une opportunité de déployer une navette autonome rurale desservant toutes les communes de la communauté de communes pour rejoindre un pôle.

Le projet concerne la création de deux lignes circulaires desservant toutes les communes organisées comme suit :

- l'une au nord en rabattement sur Bellême ;
- l'autre au sud en rabattement sur Le Theil.

Le principal frein à la faisabilité identifié est le coût élevé que représente l'automatisation.

Figure 7 : Cartographie des deux tracés identifiés pour la mesure visant une navette autonome (boucle nord et boucle sud)



L'offre proposée dans le cadre de la stratégie de mobilité est caractérisée par une fréquence d'une navette toutes les 2h30 sur la boucle nord et d'une navette toutes les 2h sur la boucle sud.

Bibliographie

- The Oslo Study – How Autonomous Cars May Change Transport in Cities Report, Ruter (2019)
- Connected & Automated Mobility 2025: Realising the benefits of self-driving vehicles in the UK, Connected and Automated Mobility 2025 (2022)
- Innovation Highway: Cover Unlocking the Social and Economic Benefits of Autonomous Vehicles, U.S; Chamber of Commerce Technology Engagement Center (2023)
- The future of mobility, Heineke et al., Mc Kinsey Quarterly (2023)
- On the impact of vehicle automation on the value of travel time while performing work and leisure activities in a car: Theoretical insights and results from a stated preference survey, de Almeida Correia et al., Transportation Research Part A (2019)
- Regulation of automated vehicles when in-service Cost-benefit analysis – Report, National Transport Commission of Australia (2019)
- Economic Aspects of Driving Various Types of Vehicles in Intelligent Urban Transport Systems, Including Car-Sharing Services and Autonomous Vehicles, Turon et Kubik, Applied Science (2020)
- Economic evaluation of autonomous passenger transportation services: a systematic review and metaanalysis of simulation studies, Carreyre et al., Revue d'économie industrielle (2022)
- Making Automated Vehicles Work for Better Transport Services: Regulating for Impact, International Transport Forum Policy Papers, No. 115, OECD Publishing, Paris (2023)
- The Future of Transportation: Ethical, Legal, Social and Economic Impacts of Self-driving Vehicles in the Year 2025, Ryan, Science and Engineering Ethics (2020)
- Towards welfare optimal operation of innovative mobility concepts: External cost pricing in a world of shared autonomous vehicles, Kaddoura et al., presented at hEART 2017 – 6th Symposium of the European Association for Research in Transportation, September 12-24, 2017 (2019)
- Assessing the Long-Term Effects of Autonomous Vehicles: a speculative approach, Gruel et Stanford, European Transport Conference 2015 – from Sept 28 to Sept-30, 2015 (2016)
- How Will Automated Vehicles Shape Users' Daily Activities? Insights from Focus Groups with Commuters in the Netherlands, Pudane et al., Delft University of Technology, The Netherlands (2018)
- Socioeconomic Impacts of Automated and Connected Vehicles, Ricci et al., National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2018 (2018)
- Comparing Automated Shared Taxis and Conventional Bus Transit for a Small City, Merlin, Journal of Public Transportation (2017)
- Not If, but When: Autonomous Driving and the Future of Transit, Lutin, Journal of Public Transportation (2018)
- Ridesourcing, the sharing economy, and the future of cities, Jin et al., Cities (2018)
- Shared versus private mobility: Modeling public interest in autonomous vehicles accounting for latent attitudes, Nazari et al., Transportation Part C, (2018)
- Shared Mobility Simulations for Helsinki – Case-Specific Policy Analysis, International Transport Forum (2017)
- Shared Mobility Simulations for Dublin – Case-Specific Policy Analysis, International Transport Forum (2017)

Shared Mobility Simulations for Auckland – Case-Specific Policy Analysis, International Transport Forum (2017)

Urban Mobility System Upgrade How shared self-driving cars could change city traffic – Corporate Partnership Board Report, International Transport Forum (2015)

Application of Driverless Electric Automated Shuttles for Public Transport in Villages: The Case of Appelscha, Boersma et al., World Electric Vehicle Journal (2018)

Driverless electric vehicles at Businesspark Rivium near Rotterdam (the Netherlands): from operation on dedicated track since 2005 to public roads in 2020, Boersma et van Arem (2018)

Technological Disruption and innovation in Last-Mile Delivery – White Paper, Stanford Business (2016)

Self-Driving Automobiles: How Soon And How Much?, University of Houston Energy Fellows, published online 2019, <https://www.forbes.com/sites/uhenergy/2019/05/21/self-driving-automobiles-how-soon-and-how-much/>

The demand for automated vehicles: A synthesis of willingness-to-pay surveys, Elvik, Economics of Transportation (2020)

China self-driving startup seeks to cut vehicle costs with road sensors, NikkeiAsia, China Tech, published online 2023, <https://asia.nikkei.com/Business/China-tech/China-self-driving-startup-seeks-to-cut-vehicle-costs-with-road-sensors>

How expensive are self-driving cars going to be?, TechBullion, Innovation, published online 2023, <https://techbullion.com/how-expensive-are-self-driving-cars-going-to-be/>