Vers une mobilité partagée en forme olympique ?

Fabien Leurent, Ecole des Ponts ParisTech

Introduction

Dans des recherches pour l'Institut de la Mobilité Durable (un partenariat entre Renault et ParisTech), j'ai modélisé des services de mobilité partagée pour différents moyens de déplacement (taxis, navettes, véhicules en libre -service) mais selon une forme commune en anneau.

Pour chacun des services, la forme d'anneau conjugue harmonieusement le principe de service en circuit (comme une ligne de TC) et une couverture importante du territoire, en admettant que chaque usager accepterait de marcher une certaine distance en amont et en aval du trajet sur l'anneau. En contraignant les véhicules du service à circuler sur cet anneau, la disponibilité est optimisée, les détours sont évités, chaque véhicule devient vraiment productif. La synergie entre l'infrastructure en anneau et la flotte de véhicules permet d'optimiser la qualité de service en temps d'accès et en temps de roulage, et conjointement de réduire les coûts de production donc d'offrir des tarifs abordables.

La communication vise à révéler ces « qualités systémiques » d'un service de mobilité partagée en forme d'anneau, ainsi qu'à explorer les conditions d'implantation d'un service en anneau pour un territoire urbanisé.

Nous commencerons par confronter les avancées technologiques pour les services à la mobilité et les services de mobilité, aux formes spatiales fondamentales en transport : véhicule, station, ligne et réseau. Puis nous montrerons qu'une forme d'anneau permet à la fois de desservir une bande de territoire relativement grande, et d'implémenter des cycles de circulation pour des véhicules mutualisés. Nous quantifierons un potentiel géographique de demande en nous appuyant sur quelques exemples de territoires en France.

Encore faut-il que le service soit attractif : doté d'une bonne qualité de service, et ce à un prix abordable. Nous avons représenté ces facteurs dans un modèle technico-économique spécifique. Le modèle générique « Orbicity » se décline par type de service. Les modèles modaux partagent une architecture en quatre étages qui traitent respectivement : (i) le fonctionnement physique du service et les lois de son trafic, (ii) l'équilibre entre l'offre et la demande de trajets, (iii) le management optimisé de l'offre, (iv) le positionnement stratégique du service, en termes de technologie et aussi de régime de régulation.

Au moyen du modèle, nous explorerons un ensemble de scénarios qui croisent deux dimensions d'analyse : génération technologique et régime de régulation. Nous montrerons non seulement que les avancées technologiques amplifient considérablement le champ des possibles, mais aussi que la régulation a une importance primordiale, permettant d'envisager un service de navettes à des tarifs très abordables, et ce potentiellement sans subventionnement par la collectivité.

1. Formes techniques et formes spatiales de la mobilité urbaine

1.1 Un renouvellement technique puissant

Les années 2010 ont été marquées par la conjonction d'innovations technologiques, leur composition en faveur de la mobilité (Leurent et al., 2018). Des technologies développées dans les années précédentes, ont été mises en synergie :

- les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) pour traiter, cartographier et administrer des bases de données géolocalisées, ont été mis en valeur par Google (Maps, Earth, StreetView) et d'autres.
- le GPS pour géolocaliser avec précision et en temps réel, est devenu disponible pour chaque entité mobile, individu aussi bien que véhicule, par des équipements portables devenus très abordables.
- la téléphonie mobile qui connecte l'individu au reste du monde, à tout moment et en tout point (couverture du réseau), est devenue avec le smartphone et son écran tactile un outil d'interaction idéal. Tout individu peut organiser sa mobilité, voir sa position au centre d'une carte des lieux, enrichir cette carte avec les informations qui l'intéressent (adresses, conditions de trafic, stations et lignes de transport public), se faire recommander des conditions d'accès et des itinéraires, et même se faire guider dans ses déplacements, par écrit ou par oral dans la langue de son choix. Et ce, parmi une multitude d'autres usages rendus possibles par les fonctions multimédia du smartphone.

L'amplification de la gestion de la mobilité par tout individu est remarquable. Pour s'en rendre compte, il suffit de repenser au calcul d'un itinéraire complexe sur le réseau de transport collectif d'une métropole, avant ou après l'avènement du web.

L'individu devient maître de son « parcours client » en tant qu'auteur de déplacement. Précisons les étapes Plan-Book-Ticket d'un « parcours client » en théorie du marketing :

- Planification d'acquisition du produit : ici, la recherche d'itinéraire pour se déplacer,
- Book : réservation si besoin dans un transport public,
- Ticket pour connaître les conditions tarifaires et acquitter son paiement.

Il s'agit là de services ***à la*** mobilité. J'insiste sur la valeur qu'ils ajoutent à la mobilité dans son ensemble, et ce pour les transports collectifs encore davantage que pour le mode automobile. La fourniture d'information, le requêtage puissant sur des bases massives et la customisation « réparent » la dissociation entre usager et véhicule qui est inhérente au transport public (cette dissociation nécessaire à un degré supérieur d'organisation, constitue un handicap originel des TC « transport collectif » face au mode VP « voiture particulière »).

Les avantages pour la demande ne s'arrêtent pas aux services à la mobilité : en effet les opérateurs et des innovateurs se sont emparés de la nouvelle donne technologique afin d'inventer ou réinventer différents véhicules et différents services ***de*** mobilité :

- réinvention du vélo, avec des variantes à assistance électrique, et des versions « mutualisables » par des services de partage avec stations (Cf. Vélib) ou sans (i.e. en free-floating, cf. Jump etc). A Paris l'été 2018 a vu la floraison rapide de services de

vélos partagés en free-floating, chacun avec une couleur différente ; presque tous sont tombés à la fin de l'automne !

- idem pour les trottinettes, modernisées, renforcées, dotées de moteurs et batteries électriques, et pour certaines mises en partage par des services de free-floating en milieu urbain. Les Parisiens ont assisté à une floraison de services au printemps 2019, puis dès l'automne une consolidation pour 3 ou 4 d'entre eux seulement.
- idem pour les voitures : la renaissance de l'automobile électrique dans les années 2000 a été manifestée dans les années 2010 par leur mobilisation pour des services urbains d'autopartage (location avec condition de retour à l'origine), de voitures partagées (location à la volée) par des services avec stations (Autolib) ou sans (Car2Go devenu ShareNow).
- sans oublier le développement de scooters électriques et leur mise en partage, par exemple CityScoot : dans le Grand Paris, ce service compte plus de 6 000 scooters fin 2019.

Chaque service de partage met en œuvre une ***plateforme informatique*** à deux faces : l'interface client assure les fonctions commerciales, tandis que la face de la production gère les ressources, les optimise de manière centralisée.

Quand l'opérateur peut mobiliser une flotte de véhicules et une troupe d'agents de service et d'entretien, il peut offrir des services porte-à-porte qui ressemblent au taxi : la compagnie Uber s'est faite le champion du « ride hailing » sur smartphone, ajoutant ainsi le Booking aux fonctions de Planning et de Ticketing, le tout de manière extrêmement fluide dans la version « client » de l'application mobile.

D'autres services en plateforme offrent de l'autopartage (ex. Drivy) ou du covoiturage, qui prospère en milieu interurbain (Blablacar), mais n'a pas encore trouvé sa formule magique en milieu urbain.

Tout cela fait écosystème : les composantes se renforcent les unes les autres. Dans leurs parcours, les véhicules glanent des informations sur les conditions urbaines en temps réel, et ces informations sont répercutées dans l'offre de services. Le développement puissant de Uber a révolutionné l'offre de service de taxis dans les métropoles et au-delà (jusqu'aux banlieues lointaines en Amérique du Nord, cf. Boutueil, 2018).

1.2 Questions de formes

La forme typique du ***véhicule*** comme moyen de transport mécanisé, souvent motorisé, est renforcée, avec une diversification de modèles permettant des adaptations aux conditions locales : petits véhicules électriques en milieu urbain très dense où l'espace est rare et où les émissions polluantes sont indésirables.

La forme typique du ***réseau de voirie*** comme support d'usages multiples, infrastructure de circulation mettant en rapport les différents lieux, est elle aussi confirmée. Les services partagés exploitent la voirie, comme support de circulation et de stationnement, et même de recharge pour les véhicules électriques.

La notion de ***station*** est plus diversifiée. Les stations des modes ferroviaires sont des hubs fixes, fortement fréquentés, à valeur de repère dans l'espace territorial. Les stations d'autobus et d'autocars deviennent plus visibles sur la voirie, grâce aux applications mobiles

qui en désignent les emplacements. Les stations de Vélib permettent à présent la mobilité électrique : par groupage des places, elles concentrent en un lieu la probabilité de trouver un véhicule disponible au moment du besoin (tout en contraignant le dépôt à la destination). Mais le free-floating met en cause la notion de station : plus exactement, il l'étale en voirie sur tous espaces disponibles pour du stationnement.

Au bout du compte, c'est la forme de ***ligne*** qui est la plus challengée :

- les itinéraires routiers aménagés sur la voirie, sont remis en question par les moteurs de recherche d'itinéraire quand ceux-ci proposent des variantes improbables (traversée de cour d'hôpital, ou passage par une petite voie de traverse entre deux sections sur des axes de niveau largement supérieur). Autrement dit, l'itinéraire customisé prend le pas sur l'itinéraire aménagé.
- en transport public, les lignes d'autobus sont concurrencées par les services partagés là où leur niveau de fréquentation ne justifie pas une forte fréquence de service. La concurrence est accrue en zone diffuse où les lignes de transport collectif ne constituent qu'un réseau lâche, à mailles très larges, et distendues en l'absence de correspondances efficaces entre les directions qui quadrillent l'espace.

Certains vont jusqu'à interroger la pertinence du mode ferré pour les déplacements à longue portée de banlieue à banlieue, dans l'hypothèse où des taxis autonomes viendraient collecter des clients par relation origine-destination pour les acheminer jusqu'à leurs destinations respectives (Cf. BCG, 2016, Delons, 2017).

1.3 Origines de la forme d'anneau

Certaines lignes de TC sont exploitées en forme d'anneau : la ligne 6 du métro de Madrid, la Circle line du métro de Londres, celle de Singapour, ainsi que dans diverses villes chinoises…([1]) ou encore la ligne « Circulator » d'autobus à Washington. La raison invoquée est de servir de courroie de transmission et de distribution de flux.

C'est le même principe qu'une rocade routière telle que le boulevard périphérique parisien, dont l'enjeu est bien la distribution, beaucoup plus que le contournement.

Le principe d'une noria pour transporter des produits (ex. de l'eau dans des seaux afin d'éteindre un incendie) ou des personnes (ex. ligne de téléphérique) est de combiner la forme de circuit avec le cycle de service des contenants. Il en résulte une homogénéisation de la charge entre les contenants, une régularisation et une intensification du rythme d'ensemble.

Une ligne de transport de forme relativement linéaire, est souvent utilisée pour des liaisons radiales, en connectant une zone dense (cœur urbain) à des espaces plus diffus (périphérie). La charge de flux est forte du côté dense et faible du côté diffus.

La forme d'anneau correspond bien à un milieu spatial relativement homogène :

- l'homogénéité du milieu contribue à l'efficacité du service en anneau,
- réciproquement, l'efficacité du service participe à l'homogénéisation de son milieu.

[1] Voir l'entrée « circle line » sous Wikipedia en anglais : https://en.wikipedia.org/wiki/Circle_Line

2. Potentiel géographique et atouts techniques d'un service en anneau

2.1 Principes géographiques : potentialités d'implantation

Quel peut être le potentiel de clientèle pour un service en anneau dans un territoire assez homogène ?

Notons A la superficie du territoire d'étude et P la population. La densité moyenne est de P/A personnes par unité de surface. Considérons encore μ le taux de mobilité par individu et par jour, typiquement de l'ordre de 3 ou 4. Dans l'espace, la « densité émissive » a priori est de $\mu P/A$ trajets émis par unité de surface.

Supposons provisoirement que l'anneau soit un cercle de rayon R, et qu'il attire en chaque point une bande de largeur 2ℓ – i.e. jusqu'à ℓ de chaque côté de l'itinéraire du parcours. Alors l'espace drainé par l'infrastructure s'étend sur une surface de $4\pi\ell R$.

Cette surface drainée se rapporte à la surface A du territoire. L'anneau dessert la proportion suivante de cette surface :

$$\theta = \frac{4\pi\ell R}{A} \quad \textit{(à borner à 1)}$$

En postulant une distribution homogène des activités dans l'espace territorial, le ratio θ s'applique d'une part aux lieux d'origine des déplacements, d'autre part aux lieux de destination. Le potentiel de marché de l'anneau est donc θ^2 fois la mobilité de l'agglomération : soit

$$\tilde{Q} = P.\mu.(\frac{4\pi\ell R}{A})^2 = \frac{P.\mu}{A}.\frac{(4\pi\ell R)^2}{A} = \frac{P.\mu}{A}.4\pi.(2\ell)^2(\frac{R}{R_A})^2$$

Ainsi les termes de la formule sont recombinés afin de faire apparaître :

- la densité émissive $\mu P/A$,
- un rayon équivalent d'agglomération noté R_A tel que $\pi.R_A^2 = A$.
- l'importance de la largeur de bande 2ℓ, affectée d'un exposant 2,
- ainsi que le rôle des rayons : le ratio R/R_A, élevé au carré, dimensionne le potentiel de demande.

Sur un territoire donné, il faudra rechercher une proportion « naturelle » entre R et R_A.

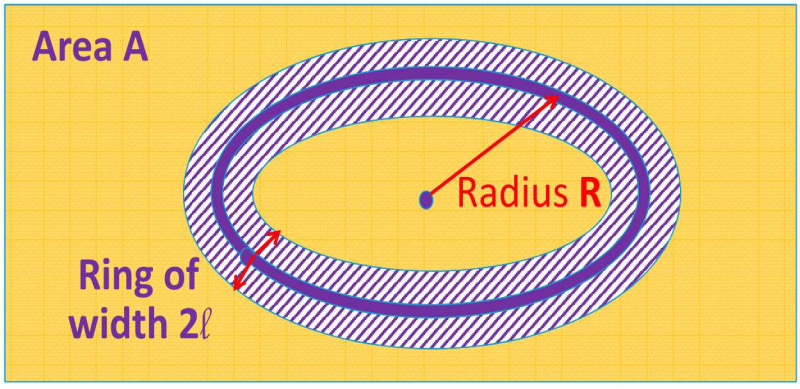


Fig. 1 : Espace desservi par une forme en anneau.

La figure 2a,b montre deux exemples pour les villes de Rennes et de Saint-Malo en région Bretagne. La figure 2c,d envisage deux cas en région Ile-de-France : l'un pour le territoire Paris-Saclay, l'autre pour l'agglomération parisienne appelée ici Grand Paris.

Nous constatons une similitude importante des résultats (Q-tilde) pour les deux valeurs de rayon envisagées : entre 10 000 et 12 000 trajets par jour pour un rayon de 3 km, ou 29 000 à 34 000 trajets par jour pour un rayon de 5 km. Dit autrement, les conditions urbaines de villes françaises diversifiées présentent des potentiels de demande intéressants. Encore faut-il offrir une qualité de service attractive, et ce, à un tarif lui aussi attractif.

Tab. 1 : Quantification de potentiels géographiques.

Caractères	**St Malo**	**Rennes**	**Gd Paris**	***VilleParis***
Surface A (km²)	80	200	2 000	*100*
R_A (km)	5	8	25	*6*
Population P (k hab)	50	300	11 000	*2 000*
P/A (k hab/km²)	0,6	1,5	5,5	*20,0*
Ratio 3/R_A	59%	38%	12%	*53%*
Ratio 2l.2.pi.R/RA^2	*74%*	*30%*	*3%*	*59%*
Q*tilde* (k trajets/jr)	38,9	37,3	13,7	*995*
Variante R = 5 km	107,9	103,6	38,0	*2 763*

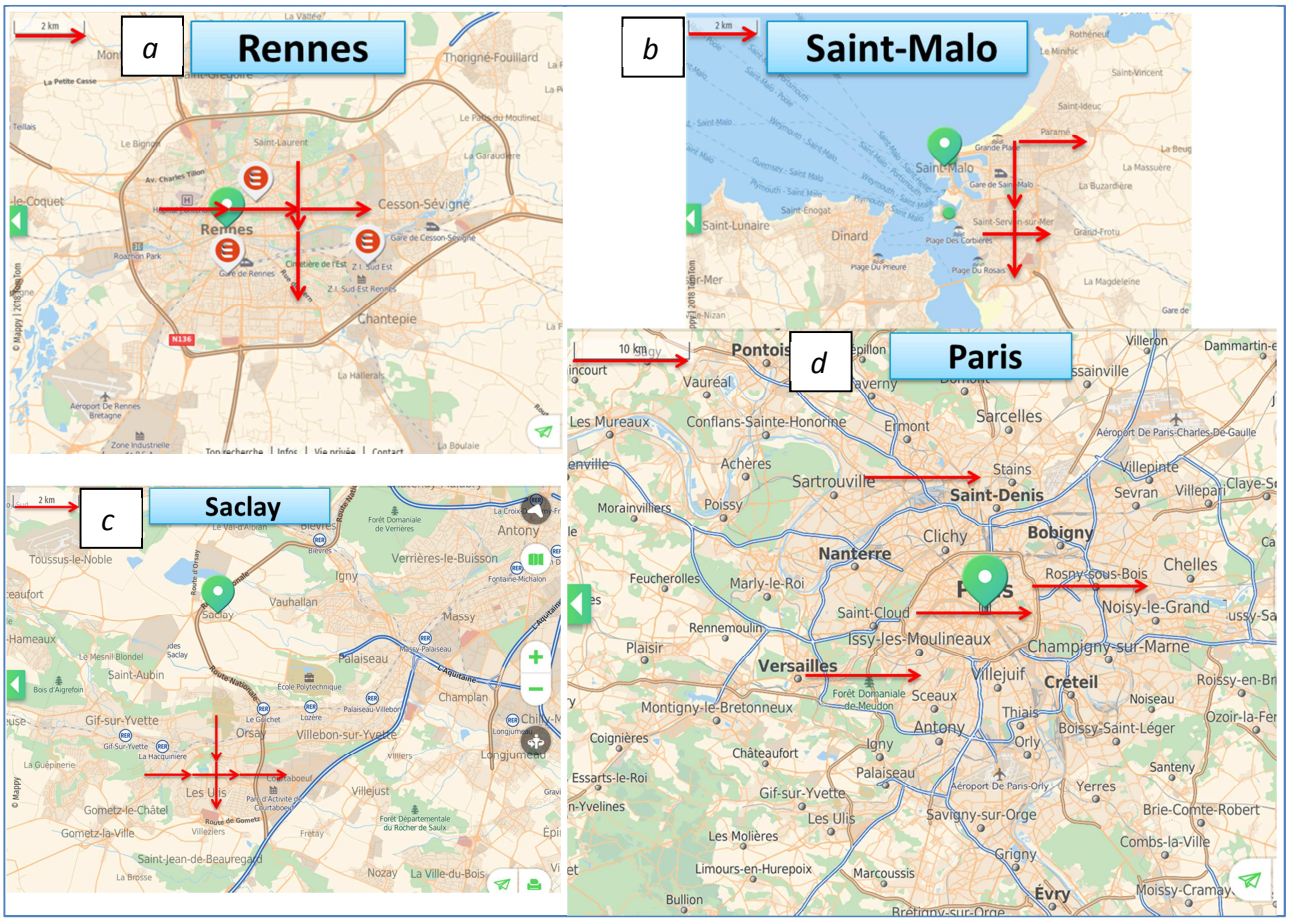


Fig. 2 : Cas de villes (a) Rennes, (b) St Malo, (c) Paris-Saclay, (d) Grand Paris.
(source Mappy, traitement auteur)

2.2 Qualité de service : quatre registres

Quel que soit le moyen de transport : navette, taxi, voiture partagée, scooter, vélo, trottinette, l'usager attend un service de qualité, une qualité de service qui soit satisfaisante pour lui.

Nous analysons la qualité de service en quatre registres :

1/ ***Maintenance et contenance*** : le véhicule doit être apte au service, en termes d'état mécanique, de charge en énergie ; il doit être propre ; si l'usage est pluriel (navette), chaque usager attend une politesse minimale de la part des autres passagers présents à bord.

2/ ***« Plaisance », incluant Protection et confort*** : les quatre-roues offrent un habitacle qui protège des intempéries et des chocs, ainsi que des sièges plus confortables que ceux des scooters et des vélos. A contrario, une trottinette impose la posture debout (ce qui offre aux sportifs des sensations dynamiques).

3/ « ***Conductance », incluant Efficacité, motricité et rapidité*** : la « conductance » est l'aptitude du véhicule à assurer les tâches de conduite, depuis le niveau des manœuvres locales jusqu'à l'acheminement à la destination. Elle est maximale pour un taxi. La motricité du véhicule repose sur ses capacités mécaniques et en particulier sa motorisation. La rapidité dépend de la motricité mais aussi de l'agilité du véhicule (plus forte pour un deux-roues) et de la fluidité des conditions de circulation.

4/ ***Aisance, incluant la Disponibilité***. Le service est d'autant plus disponible que le temps d'accès est plus faible. Une navette ou un taxi vient à l'usager, donc le temps d'accès dépend de la vitesse commerciale. Pour un mode en self-service, c'est l'usager qui vient jusqu'au véhicule, à sa vitesse de marche. Dans les deux cas, la distance initiale de l'usager au service intervient : elle dépend elle-même du nombre de véhicules, de leur état d'occupation et de la taille de l'anneau.

On peut englober dans ce registre de Disponibilité les opérations de transaction entre l'usager et le service : information, tarification, paiement et facturation, commande d'un véhicule et réservation de destination dans le cas d'un taxi ou d'une navette. A charge pour l'opérateur de simplifier au maximum les tâches associées pour l'usager.

2.3 Forme d'anneau et production de la Qualité de service

Conductance. L'attachement du véhicule à l'anneau évite les détours, les ramassages et les déposes en dehors du circuit. Cela permet d'optimiser la ***disponibilité*** du véhicule pour le service, et par conséquent la disponibilité du service pour les utilisateurs potentiels.

L'évitement des détours favorise de plus la ***rapidité*** du parcours sur l'anneau. La rapidité dépend aussi des agencements locaux de l'infrastructure, qui peut être orientée cers la fluidité du parcours. La logique d'ensemble du circuit favorise la recommandation d'une vitesse adaptée de circulation, à fixer en cohérence avec le milieu urbain et la satisfaction de l'ensemble des occupants des lieux.

Plaisance. Le registre de ***Protection et confort*** dépend surtout des véhicules : c'est donc au moment de l'équipement du service en véhicules que l'on peut fixer des spécifications en la matière. L'agencement de l'infrastructure participe aussi à la sécurité des personnes, en affectant suffisamment d'espace à la circulation, en assurant des conditions suffisantes de

visibilité, en lissant les points durs potentiels et en les signalisant pour en faire des points d'attention.

Maintenance. Celle-ci dépend à la fois de l'opérateur du service pour des dispositions préventives et curatives, des utilisateurs dans leurs comportements d'usage, et des passants et riverains. La forme d'anneau facilite la logistique des interventions curatives. Elle se prête favorablement à la télésurveillance et à des surveillances sur site : d'ailleurs ces fonctions pourraient être mutualisées avec la surveillance générale de la circulation et du stationnement.

Aisance. Revenons à la ***disponibilité*** du service : celle-ci dépend du rapport entre le niveau de demande et la taille de flotte, parmi d'autres facteurs dont la circonférence de l'anneau, la longueur moyenne des trajets des usagers et la vitesse commerciale. Le jeu conjoint de ces facteurs est complexe, et ce d'autant plus que la qualité de service influence le niveau de demande. C'est pourquoi nous avons développé des modèles technico-économiques spécifiques pour des services de mobilité en forme d'anneau.

2.4 Principes techniques

La combinaison entre une forme d'anneau et une flotte de véhicules permet des synergies fortes.

Le circuit de l'anneau dessert un ensemble de lieux, le long de sa circonférence (notée C), selon une bande d'attraction de largeur 2ℓ donc ℓ de chaque côté du circuit. L'anneau permet de collecter une certaine demande : disons un nombre Q de trajets par journée d'activité. L'anneau connecte les lieux de point à point : cette fonction est évidente sur une carte et doit être manifestée (lisible) sur le terrain. Sur son parcours, on peut localiser des fonctions logistiques de stationnement, recharge, nettoyage, en un ou plusieurs points selon le niveau des besoins.

Pour la flotte de véhicules, nous supposons à la base une homogénéité modale. Chaque véhicule peut rouler à une vitesse moyenne disons v_0. La taille de véhicule dépend du mode : notons K le nombre de places offertes à bord. Pour un deux-roues $K=1$, tandis que $K=4$ environ pour un véhicule de type automobile, ou $K=12$ pour une navette. Chaque véhicule est mutualisé, il constitue un élément de flotte dont la taille est un facteur noté N.

L'attachement de la flotte de véhicules au circuit de l'anneau permet :

- à chaque véhicule de circuler productivement, selon une logique de cycle, avec une charge moyenne de Q/N courses par jour.
- A chaque point d'être desservi avec une fréquence garantie dans le cas de navettes, ou avec une disponibilité dans l'espace assez homogène, dans le cas de véhicules partagés. Et donc, à tout utilisateur de pouvoir accéder au service en tout point.
- De mutualiser un véhicule à plusieurs places sans imposer de détour : la seule condition de mutualisation est d'arrêter le véhicule pour les montées et descentes des différents passagers. Ces actes logistiques élémentaires sont répartis entre les véhicules.

La longueur moyenne du trajet d'un utilisateur, disons L_R pour longueur de roulage, est un facteur de l'occupation des véhicules, et aussi de l'exposition de l'usager aux montées et descentes d'autres passagers.

La vitesse commerciale moyenne v dépend de l'ensemble des facteurs déjà mentionnés :

- Côté infrastructure, la circonférence C et la vitesse de roulage v_0,
- côté demande, le volume Q et la longueur L_R,
- côté véhicule, la capacité en places K et le temps d'arrêt en montée/descente t_S,
- côté service, la taille de flotte N et la plage horaire H d'activité durant la journée.

3. Modélisation technico-économique

3.1 La famille Orbicity de modèles

J'ai développé une famille de modèles, appelée Orbicity afin d'insister sur la forme d'anneau et sur le milieu urbanisé. Début 2020 cette famille compte trois modèles :

- un ***service de taxi*** : le véhicule est à usage individuel, vient chercher le demandeur au point d'origine et le dépose au point de destination (Leurent, 2019a).
- un ***service de partage de véhicules unitaires***, typiquement un deux-roues ou une voiture sans délégation de conduite : le demandeur vient chercher le véhicule au point de stationnement, voyage avec et le dépose à son point de destination (Leurent, 2019c).
- un ***service de navettes*** : avec des véhicules de K places circulant sur l'anneau les uns en sens direct et les autres en sens indirect ; ils s'arrêtent pour faire monter ou descendre chaque usager aux points demandés (Leurent, 2019b).

3.2 Architecture d'un modèle Orbicity

Chaque modèle de service est structuré sur quatre étages, qui traitent respectivement :

1. ***Le fonctionnement technique du service***, à taille de flotte N fixée, pour servir une demande fixée au niveau Q compatible avec N. Ce modèle produit le temps de parcours t_R et le temps d'accès t_A en moyenne par trajet servi, ainsi que des indicateurs de production de l'offre.
2. ***L'équilibre offre-demande*** : à offre fixée en termes de taille de flotte et de tarif, le volume Q de demande est modélisé comme une fonction du tarif et des temps t_A d'accès et t_R de parcours. Or ces temps dépendent eux-mêmes de Q, d'après le modèle de trafic. Les deux causalités s'enchaînent, ensemble elles déterminent un état d'équilibre offre-demande en termes de volume Q et de temps t_A et t_R.

3. ***Le management de l'offre***. La production du service vise l'optimisation d'une certaine fonction-objectif, dont la définition dépend du régime de régulation. Dans le cas d'un monopole non régulé, il s'agit de la fonction de profit net du producteur, égale à la différence entre les recettes commerciales et les coûts de production. Le producteur fixe la taille de flotte et le tarif afin de maximiser la fonction-objectif. La maximisation est opérée en intégrant à la fois le fonctionnement technique du service et le comportement de la demande.
4. ***Les politiques de régulation et le management stratégique de la mobilité***. A cet étage supérieur on fixe les conditions exogènes du service :
    i. le régime de régulation est spécifié parmi les options de monopole non régulé (MO), de système optimum sans contrainte budgétaire (SO), de système optimum sous contrainte d'équilibre budgétaire du producteur (S2) ou de rendement des fonds publics (S1).
    ii. la technologie du mode : capacité de véhicule (facteur K), type de motorisation (thermique ou électrique), technologie de conduite (humaine ou robotisée).
    iii. Les conditions territoriales : taille de l'anneau (circonférence C ou rayon R), vitesse moyenne de roulage (paramètre v_0), fonction de demande.

Ainsi l'étage supérieur concerne le paramétrage des conditions stratégiques du service. Pour un opérateur de service, il s'agit du marketing stratégique. Pour une autorité organisatrice des mobilités durables, il s'agit de planification stratégique.

La figure 3 schématise l'architecture en quatre étages.

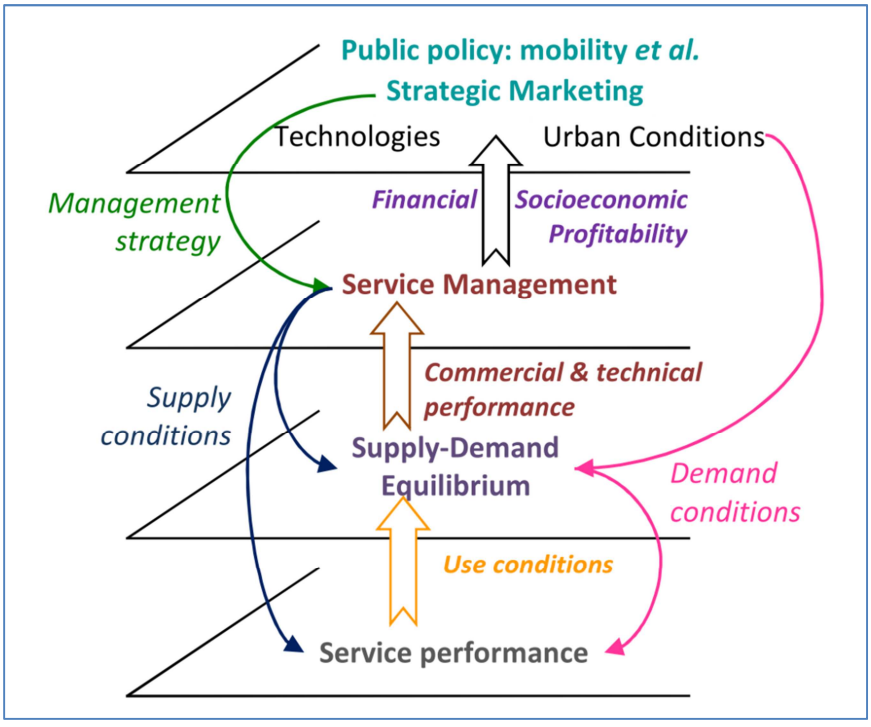


Fig. 3 : Architecture à quatre étages.

3.3 Indications sur le modèle de trafic

La figure 4 montre l'enchaînement de causalités pour déterminer les conditions de fonctionnement du trafic. Le modèle de trafic détermine un « équilibre stochastique » pour la disponibilité des véhicules, compte-tenu des demandes élémentaires et de leurs caractères aléatoires le long de l'anneau, au cours du temps, en longueur par trajet.

Il en résulte la vitesse moyenne de service, par véhicule dans la perspective de l'opérateur, et la vitesse commerciale moyenne, par usager donc dans la perspective des usagers. Ces vitesses déterminent les temps moyens de roulage et d'accès.

La figure 5 montre les variations du temps d'accès t_A et du temps de roulage t_R en fonction du volume de demande servi, pour une flotte de navettes de taille fixée.

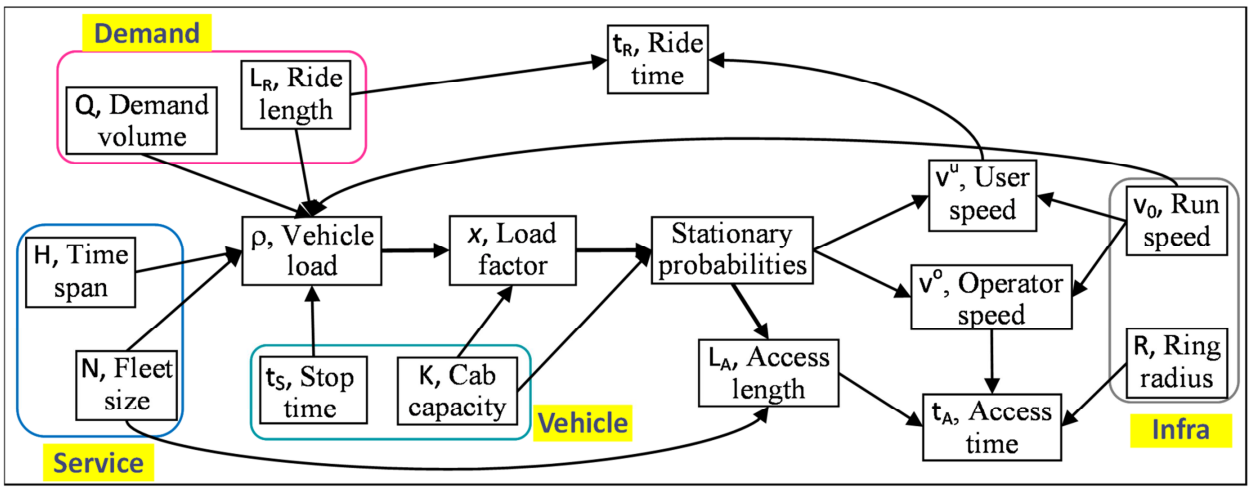


Fig. 4 : schéma logique du modèle de trafic pour un service de navettes en forme d'anneau.

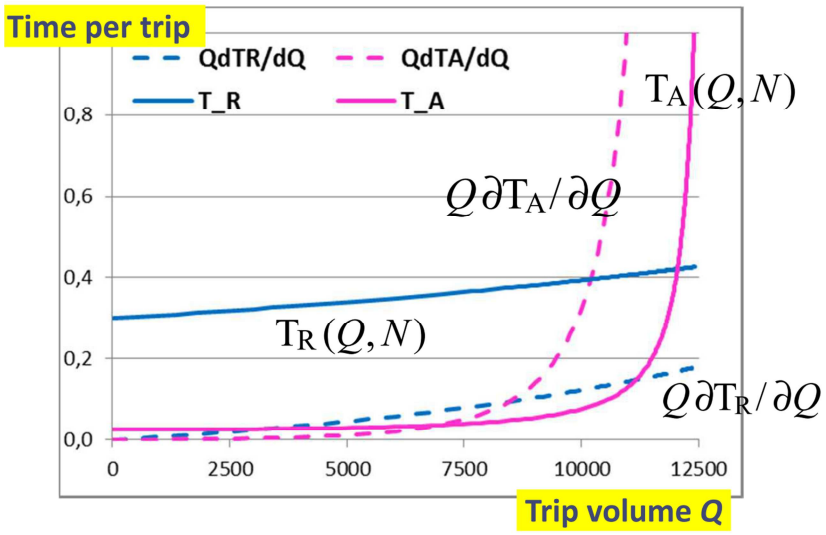


Fig. 5 : Lois du trafic pour un service de navettes en forme d'anneau

3.4 Indications sur l'équilibre offre-demande

La figure 6 montre les variations du volume de demande en fonction du tarif, à taille de flotte fixée, pour une fonction de demande à élasticité constante de -2 envers le coût généralisé (somme du tarif et des temps de parcours et d'accès pondérés par leurs « valeurs du temps » respectives). La courbe bleue montre la fonction de demande « originelle », pour des conditions de trafic exogènes, tandis que la courbe rouge illustre la fonction de demande « ajustée » qui intègre l'interaction entre le volume de demande et le fonctionnement du trafic (simulé à l'étage inférieur du modèle).

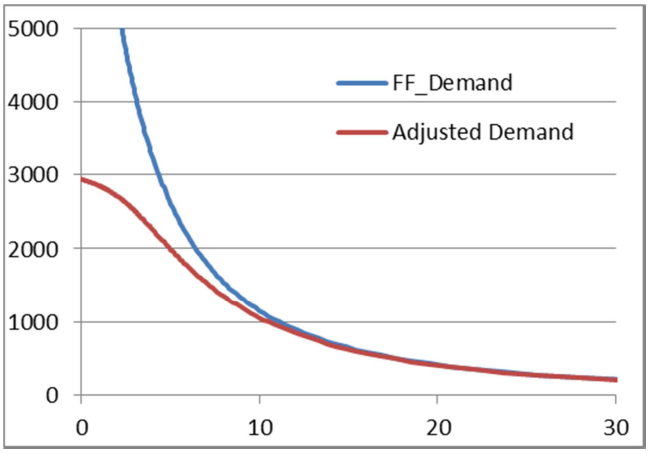


Fig. 6 : Volume de demande en fonction du coût généralisé.

3.5 Indications sur le management optimisé de l'offre

Le tableau 2 montre la fonction-objectif assignée à la production du service, selon les différents régimes de circulation qui peuvent être instanciés à l'étage stratégique.

La notation $\mathrm{Q}(\tau, N)$ désigne le volume de demande en fonction du tarif τ et de la taille de flotte N : elle résume à la fois le modèle de demande et le modèle de trafic.

La notation $C(N,Q)$ désigne le coût de production du service, en base journalière : c'est une fonction du nombre de véhicules et du nombre de trajets à servir.

Les paramètres sous-jacents, par exemple la capacité de navette ou le prix de l'énergie, sont fixés à l'étage stratégique.

Tab. 2 : Fonction-objectif et règle de tarification, par régime de régulation.

Pattern	Objective function & Side constraint	3rd type condition	
MO Monopoly	$\mathrm{P}^{\mathrm{o}}(\tau,N) \equiv$ $\tau.\mathrm{Q}(\tau,N) - C(N,\mathrm{Q}(\tau,N))$	$\tau = \frac{\varepsilon}{\varepsilon+1}(\dot{C}_Q + \mathrm{Q}\,\dot{g}_Q)$ if $\varepsilon < -1$	$\tau = \hat{\tau}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{MO}}$
SO System Optimum	$\mathrm{P}^{\mathrm{ou}} \equiv \mathrm{P}^{\mathrm{o}} + \mathrm{P}^{\mathrm{u}}$	$\tau = \dot{C}_Q + \mathrm{Q}\,\dot{g}_Q$	$\tau = \hat{\tau}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{SO}}$
S1 = SO under min benefit per €, b	P^{ou} under $\mathrm{P}^{\mathrm{u}}/(1+b) + \mathrm{P}^{\mathrm{o}} \geq 0$	$\tau \geq \frac{C}{Q} - \frac{g_T + C/Q}{1-(1+\varepsilon)(1+b)}$	$\tau = \hat{\tau}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{S1}}$
S2 = SO under budget constraint	P^{ou} under $\mathrm{P}^{\mathrm{o}} \geq 0$	$\tau \geq C(N,Q)/Q$	$\tau = \hat{\tau}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{S2}}$

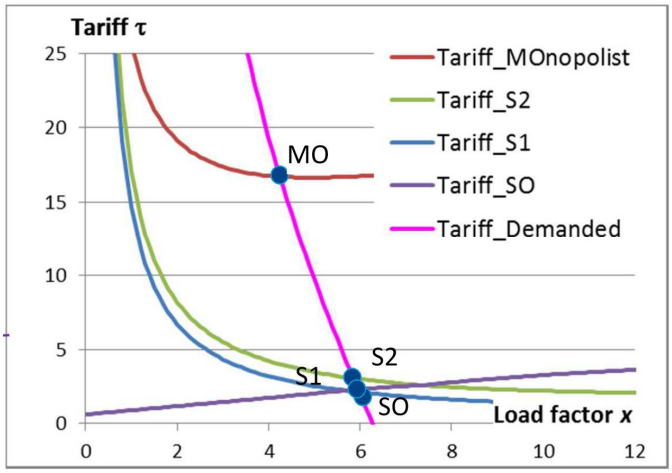


Fig. 7 : L'état général du système offre-demande est la solution d'un problème de point fixe.

La figure 7 montre sous forme graphique la résolution du problème d'optimisation de la production, dans le cas d'un service de navettes. L'inconnue principale est le tarif τ par trajet, en ordonnée. La variable x en abscisse est un facteur de charge du service : c'est le facteur-clef pour résoudre le modèle de trafic.

La fonction rose modélise le comportement de la demande : un tarif demandé $\tau^{u}(x)$.

Les autres courbes modélisent chacune un comportement du producteur : sous la forme d'un tarif offert $\tau^{o}(x)$.

Le problème d'optimisation de la production consiste à égaliser le tarif demandé et le tarif offert : pour chaque comportement du producteur, la solution est le point d'intersection (x^*, τ^*) qui assure que $\tau^{o}(x) = \tau^{u}(x)$.

4. Exploration de potentialités

Un modèle du système permet de simuler différents scénarios, en variant les valeurs données aux paramètres exogènes. Dans cette section, nous explorons les potentialités d'un service de navettes en forme d'anneau selon deux axes d'investigation : d'une part l'axe des technologies, d'autre part l'axe de la régulation.

4.1 Le domaine stratégique

Les deux axes d'investigation sont les deux dimensions d'un espace stratégique. Nous croiserons quatre degrés de technologie et trois régimes de régulation, pour constituer en tout 12 scénarios contrastés.

Les degrés technologiques sont en fait des générations technologiques qui procèdent par accumulation progressive :

0) Le degré zéro, appelé « pré-plateforme », est la situation antérieure aux services en plateforme. Par trajet, nous avons compté un temps de transaction de 2 minutes et nous l'avons intégré au coût généralisé.

1) Le premier degré de l'ère des plateformes, est la technologie de plateforme et la simplification radicale des opérations de transaction pour les clients. Nous la notons PF pour Plate-Forme.

2) La 2ème génération de plateforme met en œuvre des véhicules électriques, mieux adaptés au milieu urbain et plus économiques si l'utilisation est intensive. Nous la notons PF+EV : EV pour Electric Vehicles.

3) La 3ème génération de plateforme intégrerait la conduite autonome des navettes, afin d'abaisser drastiquement le coût de revient de la production. Nous la notons PF+EV+AD, AD pour Autonomous Driving.

L'axe de la régulation comprend trois régimes :

- MO pour un monopole non régulé, avec un opérateur unique qui vise l'optimisation de son seul profit.
- SO pour l'optimum du système socioéconomique composé de l'offre et de la demande. La fonction-objectif totalise le profit net de l'opérateur et les surplus nets des demandeurs (somme des prix de réserve diminués des coûts généralisés).
- S2 pour l'optimum du système sous contrainte d'équilibre budgétaire de la production. La fonction-objectif est identique au cas SO mais l'optimisation est limitée à l'ensemble des valeurs du couple (Taille de flotte, Tarif) qui permettent d'assurer un profit non négatif au producteur du service.

De fait l'état S2 est intermédiaire entre les régimes SO et MO.

4.2 Le service envisagé

Nous considérons un service collectif basé sur des navettes de capacité $K = 12$ places. Ainsi, la forme d'anneau correspond bien au principe du cycle de service, et la capacité par véhicule correspond bien au principe de mutualisation des transports collectifs.

La capacité limitée du véhicule assurera plusieurs avantages :

1. Au niveau du véhicule, le gabarit limité permet une certaine agilité sur la voirie et la réduction de l'impact d'un arrêt sur le fonctionnement du reste du trafic.
2. Par trajet d'usager, cela permet de réduire le nombre d'arrêts pour la montée ou la descente d'autres passagers, et donc d'augmenter la vitesse commerciale.
3. Pour servir un volume donné de fréquentation, la taille de flotte sera plus importante que pour des véhicules de plus grande capacité (de l'ordre d'une cinquantaine de places pour un autobus standard) ; cela permettra d'augmenter la fréquence du service, et donc de réduire le temps d'attente en accès.
4. Au plan industriel, la fabrication de flottes plus massives permet des économies d'échelle plus importantes et une réduction du coût de revient par véhicule. On peut aussi attendre une plus grande flexibilité dans la logistique interne du service : recharge, nettoyage, entretien et réparation.
5. Au plan environnemental, les impacts en cycle de vie de la flotte de véhicules pourront être réduits : tant pour la phase de construction, en raison de l'avantage industriel, que pour la phase d'usage, en lien avec l'amélioration de la vitesse commerciale.

A contrario, la taille réduite du véhicule collectif présente au moins deux inconvénients. Le premier est d'amplifier proportionnellement les coûts de conduite. Le second est de renoncer aux économies d'échelle dans le fonctionnement de moteurs thermiques. Mais ces

inconvénients peuvent être effacés, l'un avec la conduite autonome, l'autre avec la motorisation électrique.

Pour l'ensemble des scénarios de simulation, les paramètres communs sont spécifiés comme suit. Pour les aspects territoriaux :

- Un anneau de rayon $\mathrm{R} = 4$ km.
- Une vitesse de roulage $v_0 = 20$ km/h.

Concernant la demande :

- Une longueur moyenne de parcours de $L_{\mathrm{R}} = 7$ km.
- Un volume de référence $Q_0 = 50\,000$ trajets par jour au coût généralisé de 10€ par trajet. L'élasticité du volume de demande au coût généralisé est fixée à -2.
- Les valeurs du temps sont fixées à 25 €/h pour le temps de roulage, et 25 €/h pour le temps d'attente.

Paramètres de la production :

- Par journée d'activité, une plage horaire de $\mathrm{H} = 14$ heures.
- Par navette, un coût de revient journalier de 500€ pour une navette électrique à conduite manuelle, ou de 100€ pour une navette électrique à conduite autonome.
- Prix de l'énergie : 0.05€/km pour un moteur électrique, ou 0.15€/km pour un moteur thermique.
- Consommations d'énergie : de 10 litres/100km pour une navette thermique, ou de 15 kWh/100km pour une navette électrique.

4.3 Résultats et discussion

Le tableau 3 présente les principaux résultats de chacun des 12 scénarios simulés, un par colonne. Les scénarios sont groupés par génération technologique, selon l'ordre cumulatif du progrès technologique. Pour chaque génération les trois régimes de régulation sont présentés dans l'ordre MO – SO – S2.

Tab. 3 : Principaux résultats de la simulation des scénarios.

TECHNOLOGY	*tS=2', dC/DN=500*	pre-platform		*tS=40s, dC/dQ=.4*	Platform		*dC/dN=450 dC/dQ=.2*	PF+EV		*dC/dN=100*	PF+EV+AD	
REGULATION	MO	SO	S2	MO	SO	S2	MO	SO	S2	MO	SO	S2
Trips per day	3 361	14 685	13 712	5 446	22 657	20 886	5 950	25 459	22 444	9 295	35 113	34 004
Access time (h)	0,097	0,028	0,030	0,086	0,029	0,031	0,077	0,025	0,028	0,027	0,009	0,009
Run time (h)	0,489	0,516	0,517	0,439	0,458	0,457	0,438	0,456	0,455	0,417	0,424	0,424
Gen trip cost	38,6	18,5	19,1	30,3	14,9	15,5	29,0	14,0	14,9	23,2	11,9	12,1
Tariff fare	23,9	4,8	5,4	17,2	2,7	3,3	16,1	2,0	2,8	12,1	1,1	1,3
Fleet size	41	146	137	41	127	118	45	147	131	126	380	369
trips/day.veh	83,0	100,4	99,9	133,7	178,7	176,8	130,9	173,8	171,0	73,9	92,5	92,2
Fare revenues	80 393	71 163	74 493	93 439	60 863	68 278	95 811	50 893	63 874	112 482	39 124	43 903
Supply Cost	22 098	79 523	74 629	23 040	72 962	67 932	22 141	71 524	64 036	14 943	45 473	44 174
Supply Profit	58 295	-8 360	-136	70 399	-12 099	346	73 670	-20 631	-162	97 539	-6 349	-272
Demand surplus	129 644	270 969	261 407	165 021	336 580	323 085	172 476	356 787	334 473	215 582	419 002	411 904
System Profit	187 939	262 609	261 272	235 420	324 481	323 430	246 145	336 156	334 311	313 121	412 653	411 633
Load indicator	4,88	5,44	5,42	3,97	4,60	4,56	3,94	4,50	4,45	3,55	3,66	3,66
Load precursor	2,9	3,7	3,67	4,2	5,9	5,8	4,1	5,7	5,6	2,2	2,80	2,79

Par scénario, les lignes de la colonne associée présentent les indicateurs suivants :

- le nombre journalier de trajets : il varie de 3 000 à 35 000 entre les différents scénarios.
- Le temps d'accès moyen : il varie de un centième d'heure à un dixième d'heure. Il est systématiquement plus faible pour un régime SO ou S2 que pour le régime MO de la même technologie.
- Le temps de parcours moyen a des variations plus limitées, de .42 à .52 heure. Par technologie, il est systématiquement plus faible pour le régime MO que pour les régimes SO.
- Le tarif par trajet varie de 1.1 à 24 €. Par génération, il est systématiquement bien plus élevé pour MO que pour SO et S2, et ce dès la génération pré-plateforme. De plus le tarif S2 pré-plateforme est deux fois plus faible que celui MO de la dernière génération PF+EV+AD, ce qui montre qu'une organisation efficace du service, en forme d'anneau couplée avec le régime de régulation adéquat, importe davantage que la génération technologique.
- Le coût généralisé par trajet varie de 12 à 39 euros, par superposition du tarif et des temps de parcours et d'accès moyens (ceux-ci pondérés par leur valeur du temps spécifique).
- La taille de flotte varie de 41 véhicules, pour le scénario MO en génération pré-plateforme, à 380 pour le scénario SO en génération PF+EV+AD : le rapport de près de 10 est à confronter au rapport entre les fréquentations respectives.
- Le nombre de trajets servis par véhicule et par jour, varie de 74 pour la génération avec conduite autonome, à 180 pour la génération PF+EV.
- Les revenus commerciaux sont massifs : ils varient de 39 000 à 112 000 euros, ces deux extrêmes tous deux pour la dernière génération technologique.
- Les coûts journaliers de production sont importants aussi : ils varient de 15 à 75 milliers d'euros, en raison à la fois de la génération technologique et du régime de circulation (via la taille de flotte).
- Le profit journalier d'exploitation est nul pour les régimes S2, fortement positif pour les régimes MO et ce d'autant plus que la technologie progresse, et négatif pour les régimes SO, à des niveaux plus faibles pour les technologies extrêmes que pour les technologies intermédiaires.
- Le surplus journalier de la demande est massif : son montant est double du total des coûts généralisés des demandeurs, en raison de la spécification de la fonction de demande. Par génération technologique, les régimes SO et S2 sont bien plus avantageux pour la demande que le régime MO, et l'écart entre SO et S2 est assez faible.
- L'avantage socioéconomique du service (« system profit ») est massif : il progresse selon la génération technologique, et par génération technologique il est plus élevé pour les régimes de system optimum que pour le régime du monopole non régulé (en pleine conformité avec la définition d'optimum du système).

- Le « Load indicator » est le nombre d'occupants moyen par navette. Les valeurs s'échelonnent entre 3.5 et 5.5, ce qui suggère qu'une capacité de 12 places par navette est excessive et que l'on pourrait se contenter de 6 ou 8 places.
- Le « Load precursor » est le facteur de charge du service, noté x dans la section 3.

En résumé :

- la configuration de service se prête à des tailles de flotte importantes et même très importantes pour les régimes en « optimum du système ».
- une exploitation optimisée procure un nombre de trajets par navette de l'ordre d'une centaine par jour. Cette position médiane dans une plage allant du simple au double, permet de fixer les idées.
- Une capacité par véhicule de 6 ou 8 places devrait suffire.
- Les progrès technologiques, globalement, poussent au développement quantitatif et qualitatif du service. Cependant la conduite totalement autonome change l'économie de la production et reconfigure certains arbitrages : pour certains indicateurs, les résultants selon la génération technologique présentent une courbe en U, plutôt que des variations monotones.
- Le régime de régulation a une influence tout à fait déterminante, plus grande que celle de la génération technologique.
- Les régimes S2 qui assurent l'équilibre financier de la production du service, tout en visant l'optimum socioéconomique du système, se prêtent à un trafic relativement modéré par rapport à ceux du monopole (qui sont du même niveau qu'un taxi pré-plateforme).

La valeur espérée pour la dernière génération technologique est de 1.3€ par trajet, pour 5km en moyenne. Pour les générations technologiques intermédiaires le tarif S2 est de l'ordre de 3€ par trajet. Ces niveaux sont des repères pour jauger l'économie actuelle des services de transport collectif.

5. Conclusion

Pour un service de mobilité partagée, la forme d'anneau permet à la fois de desservir une bande de territoire relativement étendue, et d'implémenter des circulations cycliques pour des véhicules mutualisés. Ces qualités permettent l'une d'espérer une demande relativement importante, l'autre de produire le service avec une économie favorable. Par combinaison, on peut espérer une symbiose des deux qualités, selon un cercle vertueux : foisonnement de la demande, rentabilisation de la production, développement du service, permettant à la fois d'améliorer la qualité de service et de réduire le prix, et ainsi de suite.

Nous avons exploré des possibilités géographiques d'implantation et des conditions technico-économiques de rentabilisation. La forme en anneau, jointe à une gestion en plateforme et à des véhicules électriques, permettrait d'offrir des trajets à 1.5€/véh.km à l'équilibre budgétaire du producteur. En utilisant des véhicules à conduite totalement autonome, le tarif d'équilibre serait abaissé à 0.3€/véh.km.

Ces simulations reposent sur notre modèle technico-économique « Orbicity » d'un service de navettes en forme d'anneau. Le modèle postule que la demande est élastique au coût généralisé par trajet, incluant le tarif et les temps d'attente et de parcours pondérés par leur valeur du temps respective. Une telle élasticité nécessite en pratique que le service soit compétitif avec le mode Voiture particulière à tous égards, non seulement en prix et en temps passé mais aussi en confort d'utilisation : confort à bord du véhicule, facilité d'accès, qualité d'information, fluidité transactionnelle.

Notre étude d'opportunité reste à compléter par une recherche en intégration urbaine. Toutes les échelles spatiales sont à considérer :

- d'abord l'échelle micro-locale pour l'agencement de la voie de circulation,
- puis l'échelle locale des traversées de carrefour, en lien avec la gestion coordonnée des flux de trafic,
- ensuite l'échelle du quartier afin de donner à l'anneau une fonction urbaine spécifique, telle que la protection d'un quartier hypercentral en constituant une courroie de distribution et d'accès,
- et enfin, l'échelle de l'agglomération afin de constituer un plan de transport. Différents schémas sont envisageables : par exemple un réseau en forme d'étoile avec un anneau central et des liaisons radiales, ou des anneaux maillant l'espace urbain (avec ou sans intersection).

Remerciements. A Jean Grébert (expert leader sur les systèmes de mobilité chez Renault) pour la suggestion de la forme de noria. A Jaafar Berrada (Védécom) pour des discussions stimulantes à l'occasion de sa thèse de doctorat que j'ai eu le plaisir de diriger.

6. Références

Andreasson, I., Leurent, F. and Rossetti, R. (2016). *Future Developments and Research Topics*. In Gentile, G. & Noeckel, K. (eds): *Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems*, Springer Tracts on Transportation and Traffic, Vol. 10: 561-641.

BCG (2016) *Will Autonomous Vehicles Derail Trains*? Strategic study report, September 2016, 20 p.

Boutueil, V. (2018). *New Mobility Services*. Chapter 2 in Aguiléra A. & Boutueil V. (eds) Urban Mobility and the Smartphone, Elsevier, pp. 39-78.

Delons, J. (2017). *Sur la massification et la rentabilisation d'un service de covoiturage domicile-travail en Ile de France*. Communication à la Chaire-Ecoconception, Paris, 20 septembre 2017.

Ifsttar (2019) *Projet ENA : expérimentations de navettes autonomes*. Dossier de presse, 14 pages, septembre.

Leurent F. (2019a) *Microeconomics of a taxi service in a ring-shaped city*. hal-02047269. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02047269

Leurent F. (2019b) *On a Ring-Shaped Service of Collective Taxis, Part 1: Traffic Physics and Service Quality*. hal-02090947. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02090947

Leurent F. (2019c) *Modèle probabiliste d'un service de trottinettes*. ENPC Course document, 7 p.

Leurent F., Haxaire O. et Lesteven G. (2018) *La Smart Mobility : un paysage en voie d'aménagemen*t. Chapitre 21 dans Peuportier B., Leurent F. et Roger-Estrade J. (coord.) « Ecoconception des ensembles bâtis et des infrastructures, tome 2 ». Presses des Mines, Paris, pp. 487-540.

https://en.wikipedia.org/wiki/Circle_Line