Institut de la Mobilité Durable, axe 1 : Eco-systèmes de mobilité

Théorie physique et économique de Services de Mobilité Partagée dans une Ville idéalisée

Fabien Leurent, ENPC-LVMT,
Professeur de l'Ecole des Ponts ParisTech

Paris-Est, le 27 novembre 2018

Background and Objectives

BACKGROUND

- **Platform-based mobility services**
  - Platform technology has changed the conditions of transactions and their outreach
  - Transaction costs have fallen down
  - Field operations are easier to coordinate
  - The matching of resources (vehicles…) and users can now be made in real time
  - It is now easy to share resources
- **In the urban setting**
  - More customers are available in a given area
- **Soon to come: autonomous driving**
  - *The key to cheap public transit!*

AIMS

- **To explore the « relevance area » for SMS in urban areas**
  - Density economies?
  - Loading rate?
  - Profitability?
- **Analytical model**
  - To put a such system in theory, for genericity

navya

Quantification pour un mode « Taxi & VTC » sur la scène parisienne

Technologie Ressenti usager	Avant Uber	Plateforme	PF+EV	PF+EV+AD
Temps de transaction, min	10’	2’	2’	1’
Temps d’attente, min	5-10’	2-5’	2-5’	1-3’
Temps de parcours, min	25’	25’	25’	25’
Tarif, €/km	1 €/km centre, 2 €/km banlieue	1,4 €/km	1,2 €/km	0,8 €/km *Variante 0,3*
Coût généralisé, α = 25 €/h	38,8	27,3	25,3	20,1 *Variante 15,1*
Volume de demande, ε = -2	1,00	2,01	2,34	3,72 *Variante 6,60*

MODS : une Théorie des Services de Mobilité Partagée

Un territoire idéalisé : *Orbicity*

- **Forme en anneau :** rayon R
- **Paramètres**
  + Population
  + Demande de mobilité : Q = D(g)
  + Comportements individuels : parcours L_R, consentement à payer α.

Services de Mobilité Partagée

- **Service de Taxis** : Usage privatisé ; affectation au client le plus proche
- **Service de Navettes** : Usage mutualisé ; circulation en noria

Théorie analytique

- **Théorie physique : modélisation du trafic**
- **Théorie mathématique : équilibre offre-demande**
- **Théorie économique : comportement de l'offre, régulation du marché**

SOMMAIRE

- Modélisation physique du trafic | P.5
- Equilibre offre-demande | P.17
- Le problème du producteur | P.19
- Régulation du système | P.21
- Application numérique | P.26
- Conclusion - épilogue | P.27

Théorie physique : modèles markoviens du trafic

Service de taxis

- **Chaîne de Markov pour file d'attente bilatérale :**
  Variable d'état k = nb de taxis vacants si positive, ou sinon l'opposé du nb de clients en attente

- **Propriétés**
  + Le nombre de taxis occupés est presque une variable aléatoire de Poisson, tronquée
  + Equation carq du mode et de la moyenne
  + Analyse de sensibilité : propriétés formelles

- **Lois de trafic**
  + Capacité limite du service
  + Fonction de disponibilité : t = Fn (Q, N)
  + Sensibilités de ce temps => analyse marginaliste

Service de navettes

- **Chaîne de Markov à états finis** :
  Variable d'état k = nb de clients dans une navette de capacité K (le nb de places)
  Etats de roulage, d'embarquement, débarquement

- **Propriétés**
  + Equation fondamentale du trafic
  + Analyse de sensibilité : propriétés formelles

- **Lois de trafic**
  + Capacité limite du service = système de trafic
  + Les temps des deux types : parcours et attente, sont des fonctions régulières des paramètres
  + Analyse marginaliste, coûts marginaux

Model of Customer Access Time

- **Distribution law of minimum access time**
  - $t_A = L_A / v$ with $L_A = R \min_{i \in I}\{|\theta_i|\}$ and θ_i is the angular difference between the positions of the customer and vacant cab number *i*
  - Hence $1 - \mathrm{F}_{L_A}(x) = \prod_i 1 - \frac{x}{\pi R} = (1 - \frac{x}{\pi R})^k$
  - $\mathrm{F}_{t_A}(x) = \mathrm{F}_{L_A}(vx) = 1 - (1 - \frac{vx}{\pi R})^k$

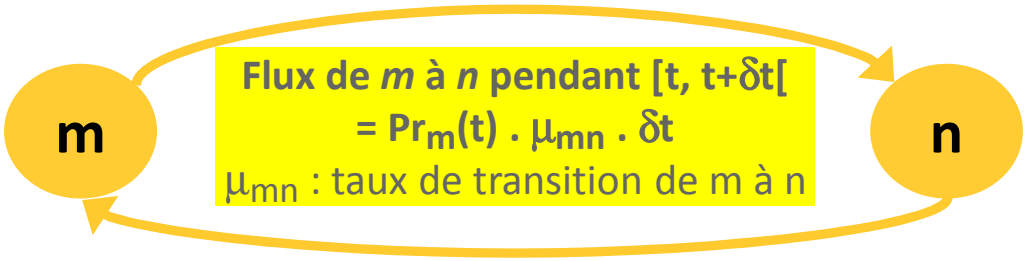
- **Average values**
  - Distance $\mathrm{E}[L_A] = \int_0^{\pi R} x \, \mathrm{dF}_{L_A}(x) = [x \, \mathrm{F}_{L_A}(x)]_0^{\pi R} - \int_0^{\pi R} \mathrm{F}_{L_A}(x) \, \mathrm{d}x$

    $\mathrm{E}[L_A] = \pi R - \pi R \int_0^1 [1 - (1-u)^k] \mathrm{d}u = \pi R \int_0^1 (1-u)^k \, \mathrm{d}u$ $\Rightarrow$ $\mathrm{E}[L_A] = \frac{\pi R}{k+1}$
  - Time $\mathrm{E}[t_A] = \frac{\pi R}{v(k+1)}$

Modèle à états et transitions

- **La probabilité est traitée en termes de stocks et de flux**
- **Gisement de probabilité au site n à l'intant t**
  - Site n : appelé « état du système » car
    la variable d'état prend ses valeurs dans l'ensemble des sites
  - Ensemble d'états = un espace de sites n

- **Flux de probabilité, par unité de temps**

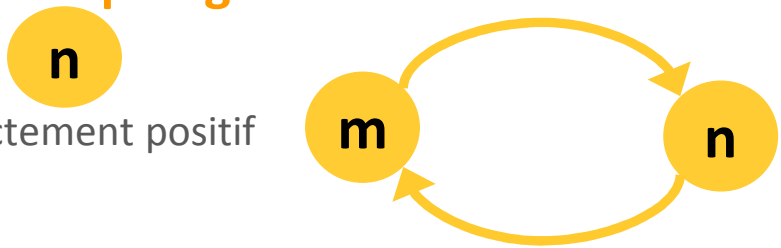


Flux de *m* à *n* pendant [t, t+δt[
$= Pr_m(t) \cdot \mu_{mn} \cdot \delta t$
μ_{mn} : taux de transition de m à n

Flux de *n* à *m* pendant [t, t+δt[
$= Pr_n(t) \cdot \mu_{nm} \cdot \delta t$

Modèle markovien : mode d'emploi

- **Modéliser l'ensemble des états n et la topologie des transitions**
  - Décrire la variable d'état et ses modalités
  - Caractériser les transitions dont le taux est strictement positif



- **Formalisme « de Markov »**
  - Propriété de Markov : le devenir du système dépend seulement de son état courant. Donc, à un instant donné, l'état courant résume l'histoire passée.
  - « Chaîne de Markov » si les états sont discrets
- **Modéliser les taux de transition**
  - Site n par couple (m, n) d'états en succession directe

Selon la physique du système !

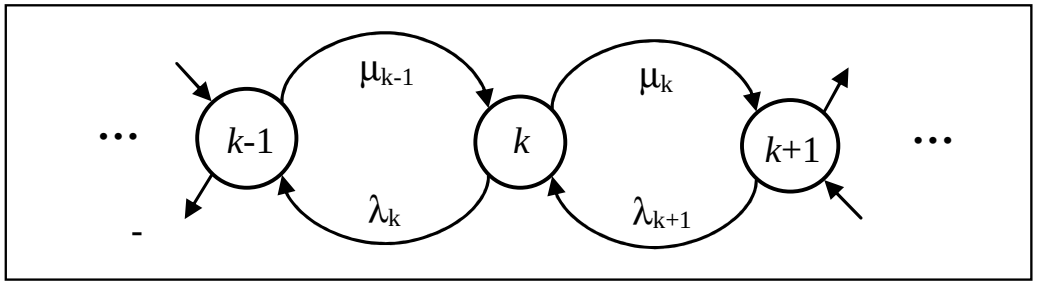
- **Rechercher l'équilibre stochastique**
  - i.e. la distribution de probabilité $Pr_n(t)$ stationnaire dans le temps
  - Une solution $(p_n)_n$ vérifie que $\sum_n p_n \mu_{nm} = p_m \; \forall m$, en plus de $p_n \geq 0$ et $\sum_n p_n = 1$

Modèle markovien du service de taxis

Les états du service

- **Variable d'état** k = nb de taxis vacants si positive, ou sinon l'opposé du nb de clients en attente

Structure des états et des transitions



C'est une « File d'attente bilatérale »

- Borne supérieure = taille *N* de la flotte de taxis
- Pas de borne inférieure

Les taux de transition

- De $\boldsymbol{k}$ à $\boldsymbol{k+1}$: si $\boldsymbol{k} \geq 0$ $\quad \mu_k = \dfrac{N-k}{t_{\mathrm{T}} + \mathrm{E}[t_{\mathrm{A}}^{\mathrm{V}/k}] + \mathrm{E}[t_{\mathrm{R}}]}$

  ou, si $\boldsymbol{k} < 0$, $\dfrac{N}{t_{\mathrm{T}} + \mathrm{E}[t_{\mathrm{A}}^{\mathrm{V}/1}] + \mathrm{E}[t_{\mathrm{R}}]}$

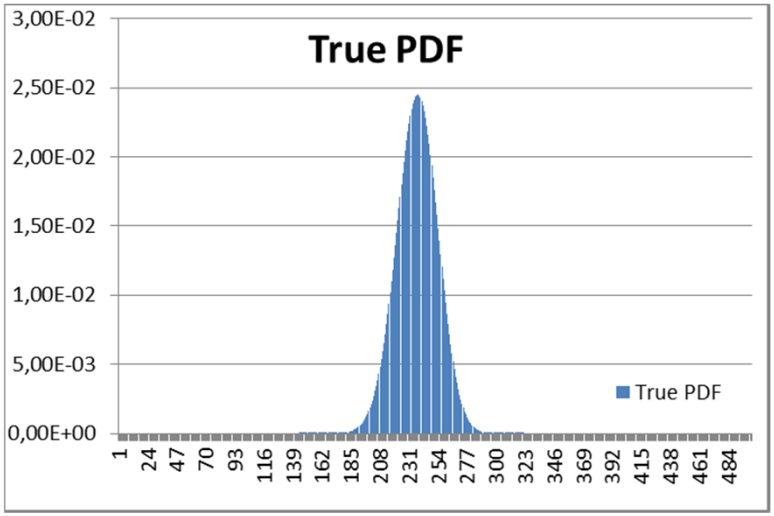
  en notant $\boldsymbol{t_R}$ le temps de parcours à bord,
  $\boldsymbol{t_R}$ le temps de transaction client-serveur, et
  $\boldsymbol{t_A}^{\boldsymbol{V/k}}$ le temps d'attente avec $\boldsymbol{k}$ taxis vacants

- De $\boldsymbol{k}$+1 à $\boldsymbol{k}$:
  si $\boldsymbol{k} \geq 0$ alors $\lambda_{\boldsymbol{k+1}} = \lambda$
  ou, si $\boldsymbol{k} < 0$, alors $\lambda_{\boldsymbol{k+1}} = \boldsymbol{r}.\lambda$
  en notant λ le débit entrant des clients,
  et $\boldsymbol{r}$ la probabilité d'accepter d'attendre

Propriétés du trafic pour ce service de taxis

Distribution stationnaire de probabilités

- Pour chaque état *k* : formule analytique
- Calcul numérique : le Nb de taxis occupés est très proche d'une loi de Poisson



Equation caractéristique

- Formule $\bar{n} = \lambda(t_T + \bar{t}_R + \bar{t}_A^V)$

i.e. Nb in System = Customer Arrival Rate x (Transaction Time + Run Time + Access Time)

- Cette équation caractérise le MODE de la distribution, de manière exacte
- C'est aussi une forme approchée de la loi de Little, pour caractériser la MOYENNE
- Notations : $\beta \equiv 2v/\pi R$, $\xi \equiv \lambda(t_T + \bar{t}_R)$ $\Big\}$ $\bar{n} = \xi + \dfrac{2\lambda}{\beta(N+1-\bar{n})}$
- SOLUTION

$$\bar{n} = \frac{N+1+\xi}{2} - \frac{N+1-\xi}{2}\sqrt{1-\frac{8\lambda/\beta}{(N+1-\xi)^2}}$$

Modèle physique du service de taxis : récapitulation

- **Architecture d'ensemble = Deux sous-modèles**
  - L'un pour le temps d'attente, l'autre pour le nb de taxis vacants
- **Loi du temps d'attente, en fonction du nb de taxis vacants**
  - Appliquée à un instant particulier
  - Formule simple grâce à la forme en anneau
- **Loi du nb de taxis occupés**
  - Une équation caractéristique simple pour le mode / moyenne : 2nd degré à une inconnue
  - Autour de cette position moyenne : des fluctuations relativement modérées
- **Pour les « grandeurs caractéristiques du système »**
  - Des formules simples pour leurs valeurs moyennes => « Format analytique » pour la suite

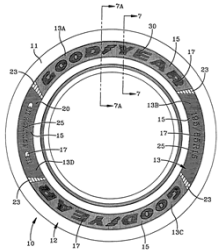
Postulates in the Shuttle Service Model

SHUTTLE SERVICE for Passenger Mobility

- **Shuttle as a vehicle**
  - Capacity K = nb of seats
- **Operational conditions**
  - Fleet size, N
  - Stop time for boarding & alighting: q per user
  - Service speed v_o and Access time t_A
  - Tariff fare t.
- **Production process**
  - Each customer is assigned to the nearest vehicle with at least one vacant seat
  - No detour – as there is only the ring road
  - Empty vehicles go on running

TERRITORIAL SYSTEM

- **Space and time**
  - Ring-shaped city : radius R & circular symmetry
  - Time period with stationary conditions: H
- **Infrastructure**
  - Circular road with two directions
  - Reference speed v_0



FIG–4

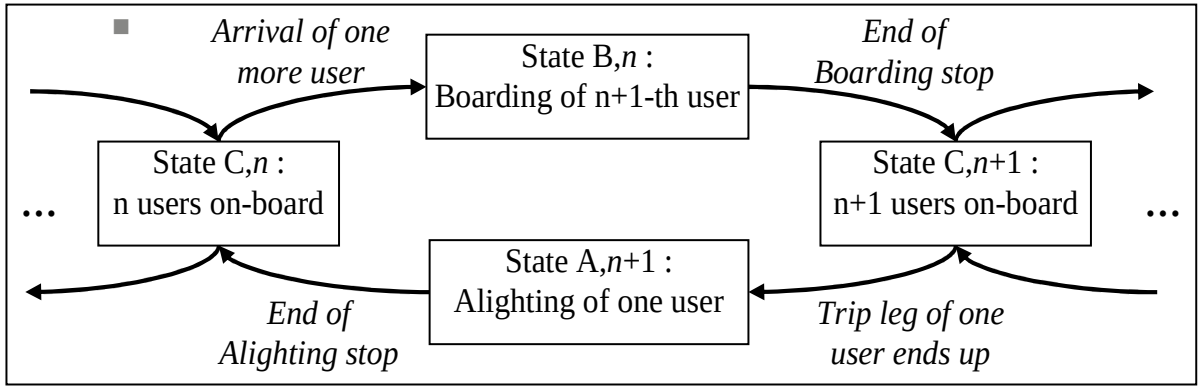
- **Mobility demand**
  - Trip generation uniformly distributed along the ring and along time
  - Individual demand: trip length L_R ; individual values of time a (acces time) and a_R (run time)
  - Demand volume Q during H

Modèle markovien du service de navettes

Système considéré

- Une navette à *K* places assises
- Variable d'état *n* = nb de places occupées, ainsi que la posture Run / Alight / Board, ces deux dernières pour des phases d'arrêt

Structure des états et transitions



Les taux de transition

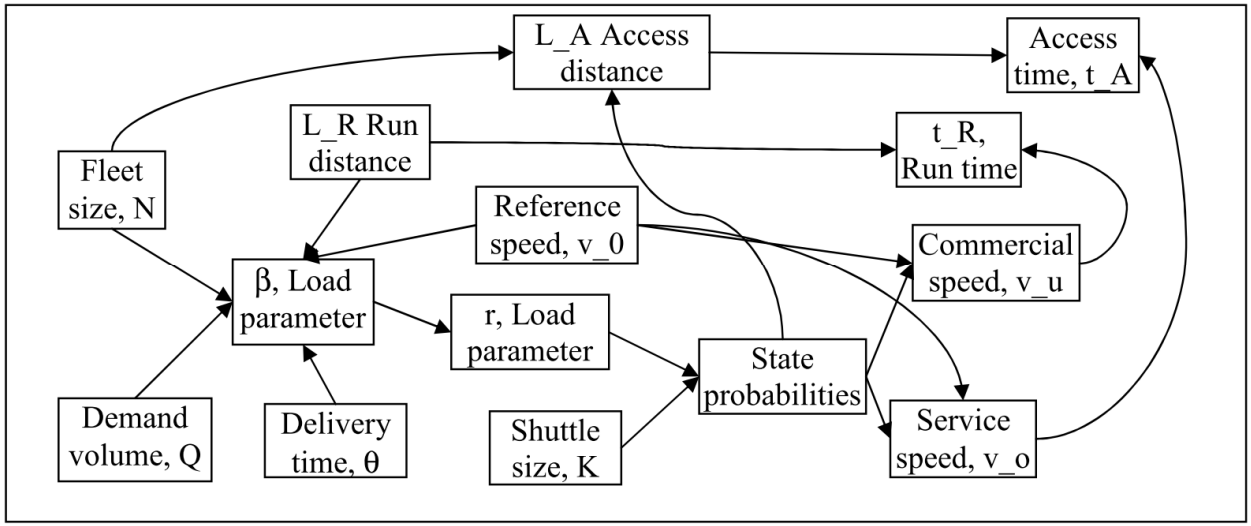
- De $(\boldsymbol{C},\boldsymbol{n})$ avec $\boldsymbol{n} < \boldsymbol{K}$, à $(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})$, à chaque arrivée d'un client dans le véhicule, au taux de transition λ
- De $(\boldsymbol{B},\boldsymbol{n})$ à $(\boldsymbol{C},\boldsymbol{n}+\mathbf{1})$: l'arrêt pour montée s'achève au taux de transition $1/\boldsymbol{\theta}^{+}$
- De $(\boldsymbol{C},\boldsymbol{n})$ avec $\boldsymbol{n} \geq \mathbf{1}$ à $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{n})$: à chaque fin de trajet d'un client à bord, au taux de transition$\boldsymbol{n}\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}$ en notant $\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}} = \boldsymbol{v}_{\mathbf{0}}/\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{R}}$ l'inverse du temps de trajet
- De $(\boldsymbol{A},\boldsymbol{n})$ avec $\boldsymbol{n} \geq \mathbf{1}$ à $(\boldsymbol{C},\boldsymbol{n}-\mathbf{1})$: l'arrêt pour descente s'achève au taux de transition $1/\boldsymbol{\theta}^{-}$

Equations du régime stationnaire

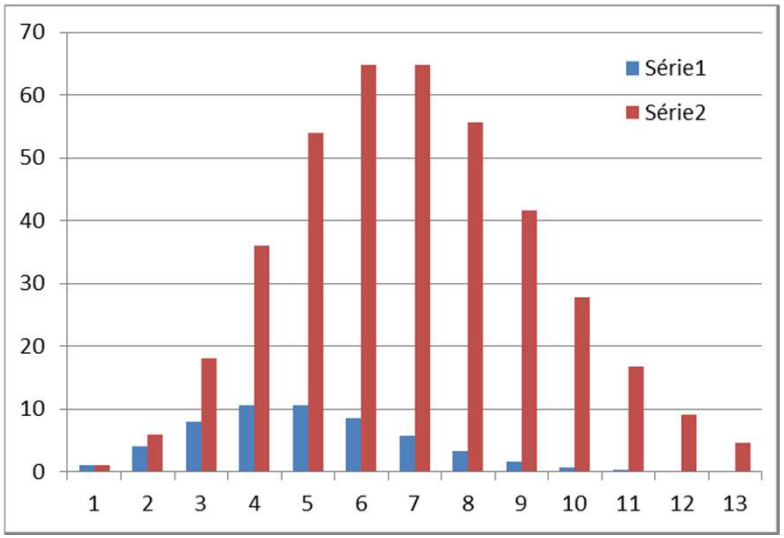
- Paramètres $\boldsymbol{Q},\boldsymbol{H},\boldsymbol{N},\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{R}},\boldsymbol{v}_{\mathbf{0}},\boldsymbol{\theta}$ avec $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^{+} + \boldsymbol{\theta}^{-}$
- Equation unique en fonction de $\boldsymbol{r} = \lambda/\boldsymbol{\mu}_{\mathbf{1}}$

Illustrations

- The structure of causalities

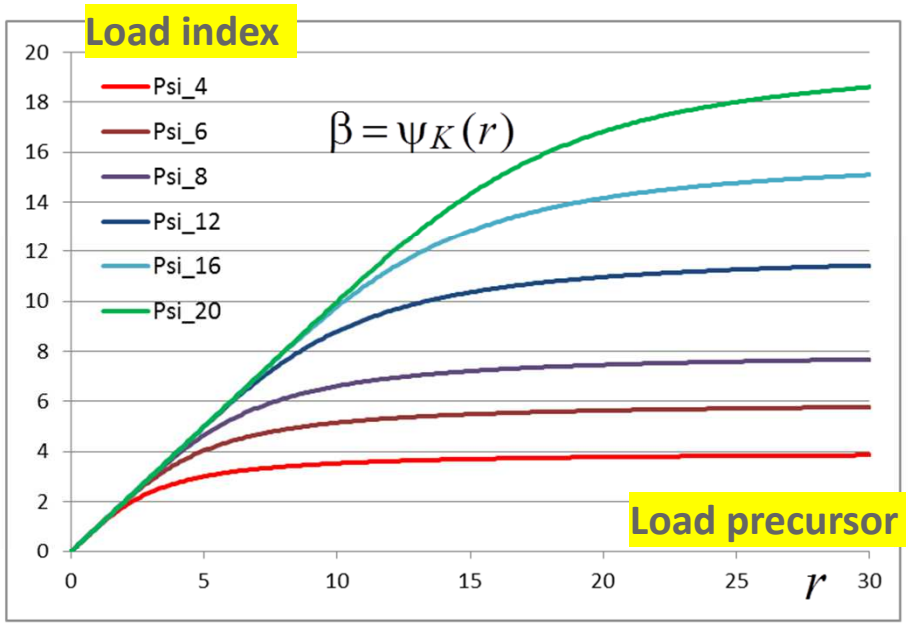


- Stationary distribution



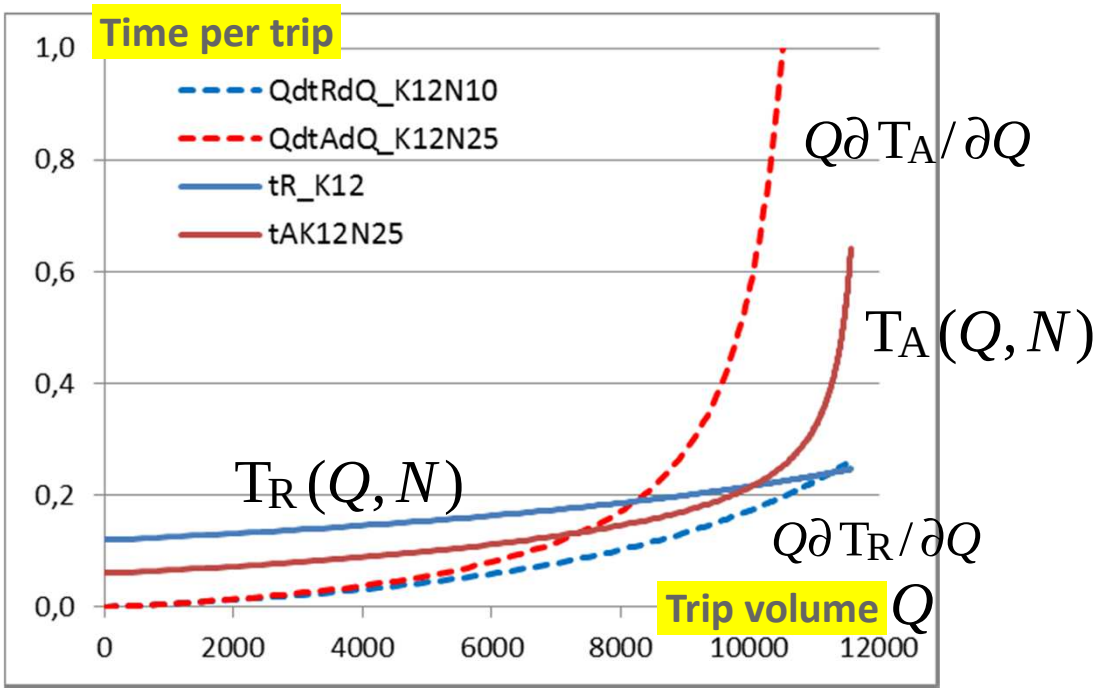
Service de navettes : lois du trafic

- Fundamental Traffic Equation



$$\beta \equiv \frac{L_R}{v_0}\frac{y}{1-\theta y} \quad \text{with} \quad y \equiv \frac{Q}{HN} \quad \Rightarrow \quad r = \psi_K^{(-1)}(\beta)$$

- Traffic laws: time functions



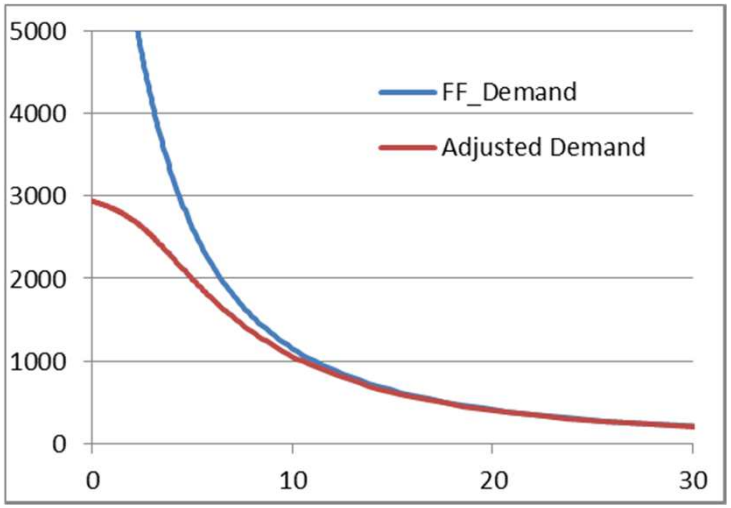
Service time as a Twofold issue:

+ Run time T_R, with congestion externality $Q.dT_R/dQ$

+ Access time T_A, with congestion externality $Q.dT_A/dQ$

Supply-Demand Equilibrium => Adjusted Demand

- **Demand function and its adjustment**
  - "Original" Demand Function: $Q = \mathrm{D}(\tau, t_A, t_R)$
  - "Adjusted" Demand Function:
    $Q = \mathrm{D}(\tau, \mathrm{T_A}(Q,N), \mathrm{T_R}(Q,N)) \equiv \mathrm{Q}(\tau, N)$
  - Equivalently:
    $\tau = \mathrm{D}_\tau^{(-1)}(Q, \mathrm{T_A}(Q,N), \mathrm{T_R}(Q,N))$



- **(Short term) Supply-Demand Equilibrium**
  - Given (τ, N)
  - Existence and uniqueness
- **Properties: sensitivities and elasticities**

$$\dot{\mathrm{Q}}_\tau = \frac{-1}{\dot{g}_Q - \frac{1}{\dot{\mathrm{D}}_\tau}} \leq 0$$

$$\varepsilon_{Q:\tau} = \frac{\varepsilon_{D:\tau}}{1 - \varepsilon_{D:\tau}\varepsilon_{g:Q}\, g/\tau}$$

$$\dot{\mathrm{Q}}_N = \dot{g}_N\, \dot{\mathrm{Q}}_\tau \geq 0$$

$$\frac{1}{\varepsilon_{Q:N}} = 1 + \frac{\tau(1+\varepsilon_{\mathrm{D}:t_A})}{g\,\varepsilon_{D:\tau}\varepsilon_{g:N}}$$

Analyse mathématique de l'équilibre offre-demande

- **Equilibre de court terme**
  - Les paramètres de l'offre sont fixés : taille de flotte et tarif
  - Le volume de demande est endogène, il dépend de la qualité de service et du tarif via une « fonction de demande »
  - La qualité de service est endogène, elle dépend du volume de demande via les lois du trafic
- **Formulation mathématique : un système d'équations**
  - On le réduit à une seule « inconnue » : le volume de demande
- **Analyse mathématique => établissement de propriétés**
  - Existence et unicité de la solution
  - Sensibilité de cette solution à des variations de chaque paramètre

Théorie économique : Microéconomie d'un service partagé

- **Pour le producteur : un problème de management**
  - Fonction de production => des coûts CAPEX & OPEX + Demande potentielle et recettes associées
  - Choix du **tarif** et de la **taille de flotte** + Décision d'implantation : Go / Nogo
    + pour Navettes : taille de véhicule
- **Le régulateur impose la gestion : MOnopole / Optimum absolu SO ou contraint S2**
  - Si la demande a une élasticité de -2 au coût généralisé : alors, relativement à **l'optimum de 2nd rang S2**,
  - **Taxis** : le **monopole MO** a un tarif double, un temps d'attente double mais un usage 4 fois moindre.
    Ces ratios sont augmentés entre le **monopole MO** et **l'optimum collectif SO**
  - **Navettes** : entre **MO** et **SO**, ratio de 5-6 entre les tarifs, de 2-3 entre les temps d'attente
    Entre **S2** et **SO**, les ratios sont atténués : +30% sur le tarif, donc **S2** est un mode gestionnaire adéquat
- **Technologies**
  - **Plateforme** : automatisation des opérations de transaction => très forte réduction des temps requis, et ce pour le passager comme pour le service (conducteur + agent en central) **+ pour Navettes :** gestion temps réel du remplissage
  - **VE** : baisse légère du coût d'exploitation
  - **AD** : baisse forte du coût de conduite => répercussion sur le tarif

Le producteur : stratégie de gestion

- **Fonction de production**
  - Moyens de production => CAPEX
  - Niveau d'utilisation selon la demande => OPEX

Modèle d'affaire

- Qualité de service t_A, t_R.
- Fonction de coût C(N, Q)

- **Fonction de demande :** $Q = D(t_A, t_R, \tau)$ selon le marché ciblé
- **Fonction de profit :** $P^o = \tau.Q - C(N, Q)$

Comportement du producteur : gérer au mieux le service

- **Fonction objectif**, selon le mode de régulation :
  $P = P^o$ si Monopole, ou $P = P^o + P^u$ pour « l'optimum collectif »,
  P^u étant la fonction de surplus de la demande
- **Variables de décision (leviers d'action) :** le tarif τ et la taille de flotte N.
- **Problème d'optimisation** : Max P en fonction de τ et N,
  (le cas échéant, sous contrainte que $P^o \geq 0$)

Taxi Economics: Access Time and Fleet Size

- Average Access Time: formula $\bar{t}_A^V \approx \frac{N+1-\xi}{2\lambda}\left(1-\sqrt{1-\frac{8\lambda/\beta}{(N+1-\xi)^2}}\right)$
  - Stationary condition $N \geq \bar{n}$

    => $N \geq \xi + \sqrt{2\lambda/\beta}$

- **Revolution in perspective: turning from t_A to N as the dependent variable, and from N to $t = t_A$ as the exogenous factor**
- **Yielding Target Fleet Size** $\hat{N}(t,Q) = \frac{Q}{H}(t_{RT}+t) + \frac{2}{\beta t}$
  - Wherein: $Q \equiv H\lambda$ period trip demand and $t_{RT} \equiv \bar{t}_R + t_T$ adds up Run and Transaction Times
  - Remind notations $\beta \equiv \frac{2v}{\pi R}$ and $\xi \equiv \lambda(t_T + \bar{t}_R)$

Supply Management: Cost Function

- **Production costs:** on a daily basis, $\mathrm{C}_P(N,Q) \equiv \chi(N) + Q\,\mathrm{c}_u(t_\mathrm{R} + t_\mathrm{A})$
  - Wherein $\chi(N)$ denotes the holding cost of vehicles and associated driving, together with platform and central management, whereas $\mathrm{c}_u \equiv c_d / v$ with c_d run cost per unit distance
- **With respect to Volume *Q* and Quality target *t*:**

$$\mathrm{C}^\mathrm{o}(t,Q) \equiv \mathrm{C}_P(\hat{N}(t,Q),Q) = \chi(\hat{N}(t,Q)) + Q\,\mathrm{c}_u(t_\mathrm{R} + t)$$

- **Sensitivity analysis:**
  - $\dfrac{\partial}{\partial t}\mathrm{C}^\mathrm{o} = Q\,\mathrm{c}_u^+ - \dfrac{2\dot{\chi}}{\beta t^2}$ and $\dfrac{\partial}{\partial Q}\mathrm{C}^\mathrm{o} = \mathrm{c}_u^+\, t + \zeta$

    with $\mathrm{c}_u^+ \equiv \mathrm{c}_u + \dfrac{\dot{\chi}}{\mathrm{H}}$ and $\zeta \equiv \mathrm{c}_u\, t_\mathrm{R} + \dfrac{\dot{\chi}}{\mathrm{H}} t_\mathrm{RT}$

Analytical Properties

- Characteristic set of conditions for System state
- Existence and uniqueness of Solution, under capacity condition
- Closed-form system of equations for constant demand elasticity
  - Elasticity ε of demand volume *Q* to Generalized cost of travel $g \equiv \tau + \alpha t_A + \alpha_R t_R + \alpha_T t_T$
- Closed-form formulae for particular values of ε :
  - MO, SO and S2 models with ε = -2
  - SO and S2 models with ε = -1

Theoretical Properties

Under ε = -2

- **Between Monopoly and System Optimum**

$$\sqrt{\frac{Q^{MO}}{Q^{SO}}} = \frac{g^{SO}}{g^{MO}} = \frac{t^{SO}}{t^{MO}} = \frac{\tau^{SO} + \alpha \tilde{t}_{RT}}{\tau^{MO} + \alpha \tilde{t}_{RT}} = \frac{1-x}{\frac{1}{2}-x}$$

  - Wherein $x = \frac{1}{g_0}\sqrt{\frac{2\dot{\chi}(c_u^+ + \alpha)}{\beta Q_0}} \in [0, \frac{1}{2}]$

- **Between MO and 2nd best System Optimum**

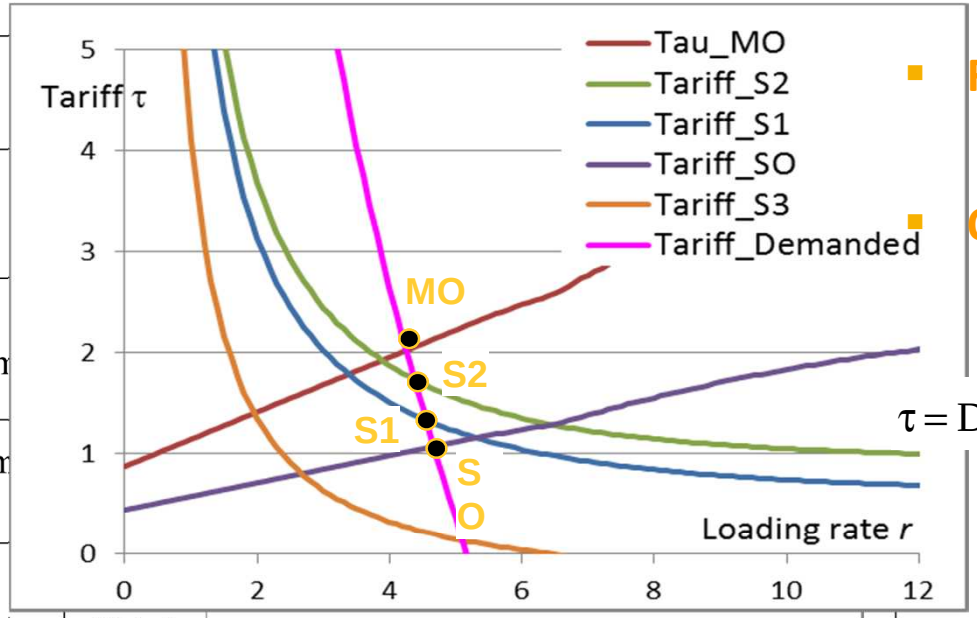
$$\sqrt{\frac{Q^{MO}}{Q^{S2}}} = \frac{g^{S2}}{g^{MO}} = \frac{t^{S2}}{t^{MO}} = \frac{\tau^{S2} + \alpha \tilde{t}_{RT}}{\tau^{MO} + \alpha \tilde{t}_{RT}} = \frac{1}{2}$$

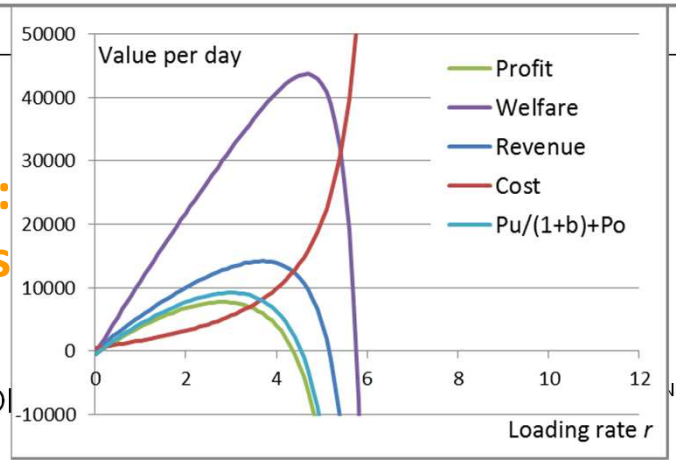
MEANING

- **Passing from MO to S2 and SO**
  - Generalized Cost is more than halved
  - Access Time is more than halved
  - Tariff Fare is more than halved
  - Demand Volume is multiplied by 4+
- **So that there is a "virtuous circle" of cab services:**
  - Reduced Tariff Fares AND Access Times BOTH INCREASE Demand Volume, thereby enabling for larger fleet size and additional service availability

Service de navettes : offre et régulation

Policy	
MO Monopoly	
SO System Optimum	
S1 = SO under m benefit per €, *b*	
S2 = SO under budget constraint	$P^o \geq 0$





Impacts socioéco : profits, surplus

- **For each management program**
  - Solution does exist and is unique
- **Optimality conditions of a program**
  - Two conditions hold for every policy: Demand function & Fleet size condition

$$\tau = D_\tau^{(-1)}(Q, T_A(Q,N), T_R(Q,N)) \text{ and } \dot{C}_N = -Q\dot{g}_N$$

  - One specific condition: restated as

$$\tau_r = \hat{\tau}_r^{(i)}$$

i.e. equality of "demand-side" and "supply-side" tariff functions

- **Computation scheme**
  - Parametric analysis with respect to *r*.

Comparaison des Services, selon la Technologie et la Régulation

Taxis

TECHNOLOGY		pre-platform			platform			PF+EV			PF+EV+AD	
REGULATION	MO	SO	S2	MO	SO	S2	MO	SO	S2	MO	SO	S2
Trips per day	947	4 327	3 787	1 571	7 181	6 283	1 926	8 712	7 703	6 200	26 001	24 801
Access time (h)	0,075	0,035	0,038	0,058	0,027	0,029	0,054	0,025	0,027	0,020	0,010	0,010
Gen trip cost	72,68	33,99	36,34	56,42	26,39	28,21	50,95	23,96	25,48	28,40	13,87	14,20
Fare	56,81	19,13	21,41	44,31	15,05	16,83	38,95	12,67	14,15	17,67	3,39	3,72
Fleet size	53,3	206,1	182,3	67,8	261,3	231,2	80,6	311,8	278,3	230,1	860,2	822,8
trips/day.veh	17,7	21,0	20,8	23,2	27,5	27,2	23,9	27,9	27,7	26,9	30,2	30,1
Fare revenues	53 779	82 771	81 085	69 598	108 096	105 740	75 016	110 391	109 016	109 587	88 259	92 287
Supply Cost	23 552	91 690	81 078	30 661	119 583	105 728	31 477	122 138	109 003	25 567	96 479	92 260
Supply Profit	30 226	-8 919	7	38 937	-11 487	12	43 539	-11 747	13	84 020	-8 220	27
Demand surplus	68 798	147 095	137 595	88 623	189 484	177 247	98 127	208 712	196 255	176 071	360 561	352 142
System Profit	99 024	138 176	137 603	127 561	177 997	177 259	141 666	196 965	196 268	260 091	352 341	352 168

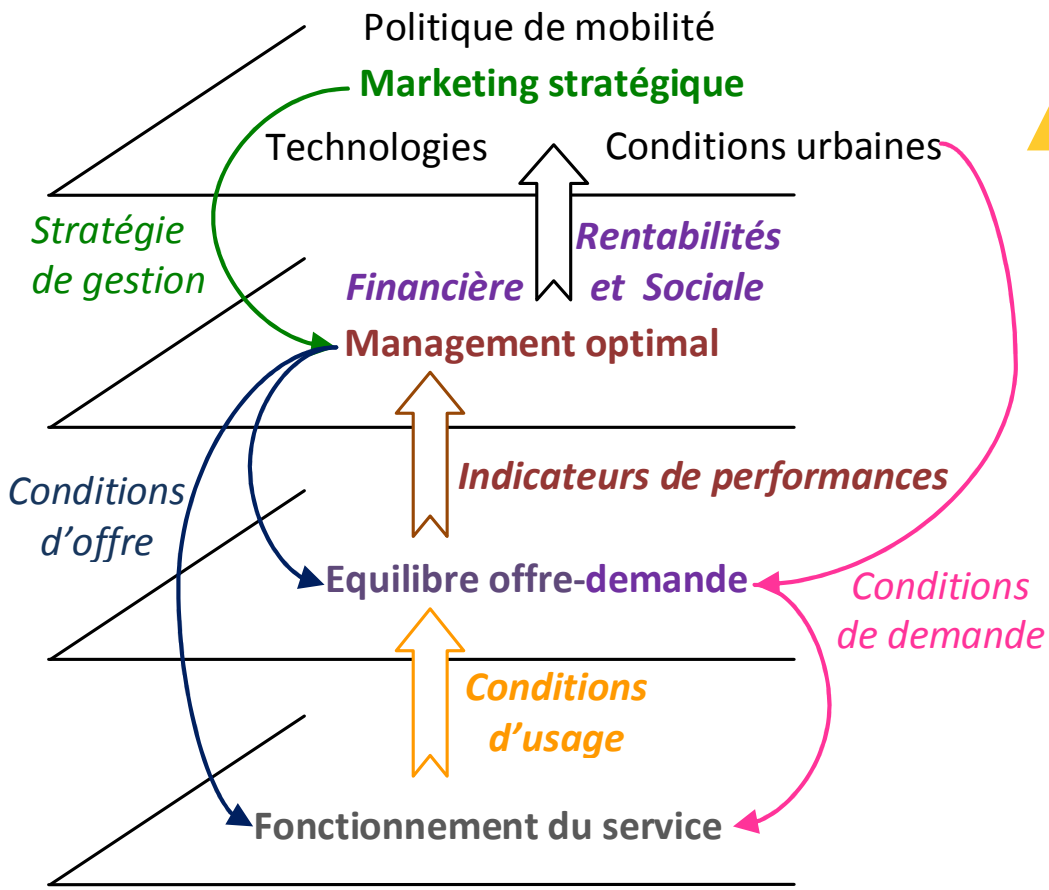
Shuttles 12 seats

TECHNOLOGY	*Theta=2', cdotN=500*	pre-platform		*Theta=40s, cdotQ=0,4*	Platform		*cdotN=450, cdotQ=0,2*	PF+EV		*cdotN=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

Messages-clefs

- **Les opportunités technologiques boostent la mobilité partagée**
  - **Plateforme** : la connectivité (et le trio smartphone-appli-web comme aubaine)
  - Le **VE** urbanise l'automobile et abaisse le coût de production
  - **Autonomous driving**: forte baisse des coûts de production
- **Le mode de régulation est tout aussi déterminant**
  - **MOnopole** : le producteur capture la valeur
  - **SO** Optimum collectif : besoin de subventions publiques pour tirer pleinement parti des opportunités
  - **S2** : un bon compromis
- ***Intérêt de la théorisation***
  - *Idéalisation du territoire => un scénario optimiste*

Une architecture systémique



- **Prospecter**
  - Configurations : distances et densité de la demande
  - Technologies de transaction et de conduite
  - Des stratégies de gestion, des modes de régulation
- **Simuler la gestion**
  - Fixation du tarif et de la taille de flotte
- **Simuler l'équilibre offre-demande**
- **Simuler le fonctionnement et les impacts**
  - Le service, gestion en local et centralisée => circulation des véhicules et accueil des clients
  - Fixation du tarif et de la taille de flotte
  - Demande d'usage => temps de roulement et temps d'attente

Construction Bottom-Up

Prolongements

La plurimodalité

- **Par déplacement :** « affectation modale »
  + à un véhicule privatisé : Taxi,
  + ou à un véhicule mutualisé : Navette
- **Multimodalité :** compétition Taxi / Navette et aussi avec la VP et les TC par lignes
- **Intermodalité** : considérer aussi les 2 roues et EDP

Approfondir l'évaluation

- Intégrer l'environnement
- Économie et société : circulation des valeurs dans le système productif intersectorielle, et distribution des revenus

La voirie

- **Agencement** :
  + Accès des bâtiments
  + Stationnement sur ou hors voirie
  + Files de circulation : partage entre les modes
  + Tronçons et jonctions
- **Exploitation :**
  + Régulation des jonctions : contrôle du flux

Régulation multi-niveaux

- Usage des services, usage de la voirie, détention des véhicules privés, taxation de l'énergie, etc

La place des maths dans tout cela

- **Morphologie et topologie**
  - Géométrie : forme en anneau pour l'espace physique
  - L'espace mathématique des sites-états d'un modèle markovien
  - Topologie des transitions
  - Enchaînements logiques
  - Architecture du système de modélisation
- **Langage formel**
  - Expression explicite pour des Postulats / Hypothèses / Déductions
  - Maniable : permet des recompositions
- **Calcul formel - logique**
  - Etablissement de conséquences
- **Portée théorique**
  - Chaque formule porte une signification
  - Propriétés physiques : la théorie des probabilités comme science de l'agrégation (th Markov)
  - Propriétés économiques : théorie de l'optimisation
- **Des engagements rigoureux**
  - Présentation réfutable des postulats et des étapes logiques
  - Capacité numérique