

Des modèles numériques aux modèles théoriques : *Le cas de la tarification des routes en Ile-de-France*

François Combes (SPLOTT)

Nicolas Coulombel (LVMT)

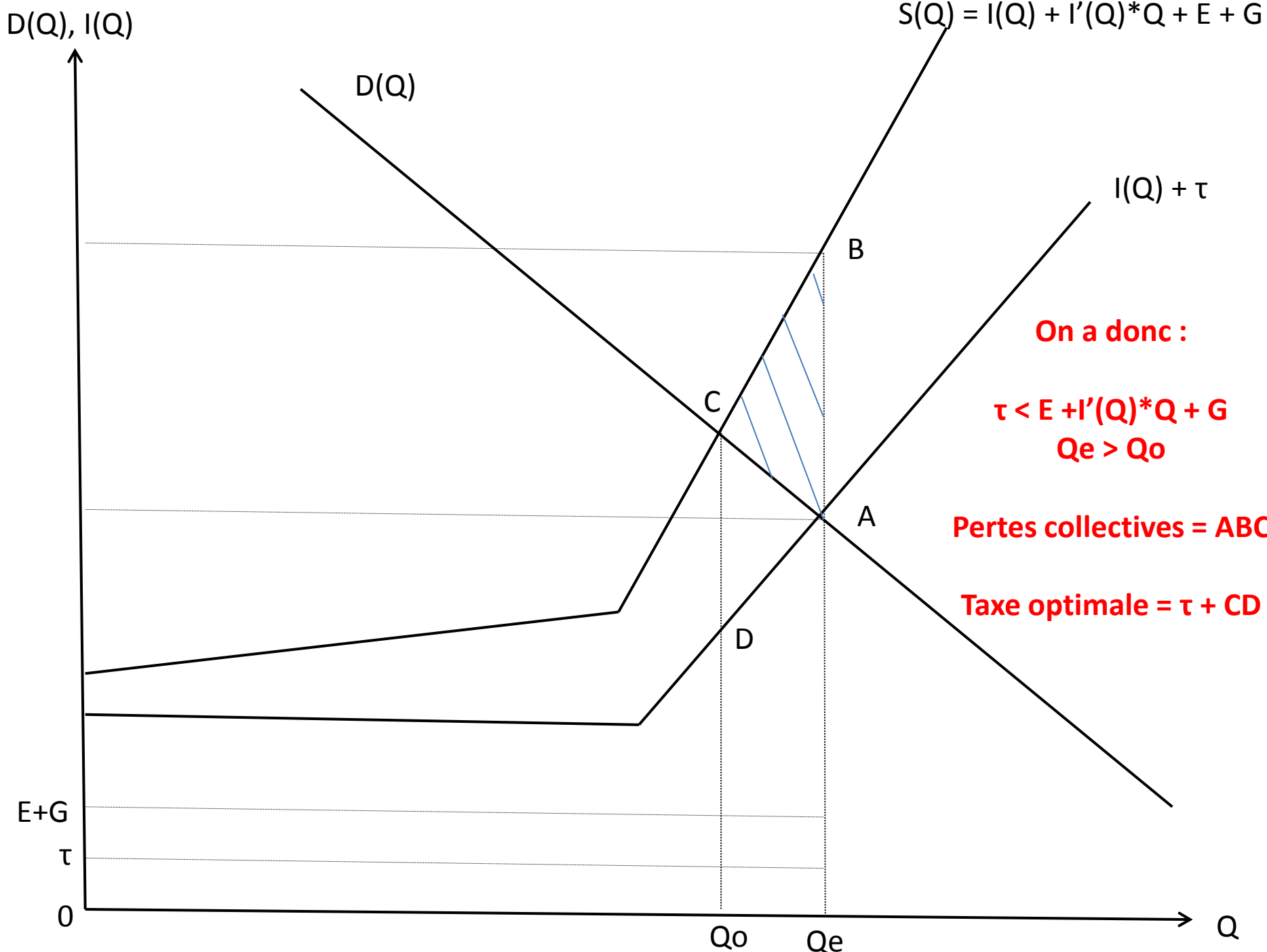
Martin Koning* (SPLOTT)

Motivations

- Paradoxe français (mais pas uniquement) :
 - Les routes payantes sont celles où les externalités négatives sont a priori les plus faibles (interurbain)
 - Les routes gratuites sont celles où les externalités négatives sont les plus coûteuses (urbain dense)
- Questions théoriques sous-jacentes :
 - Quels devraient être les niveaux optimaux des trafics routiers et des taxes en ville ?
 - Quelles pertes de bien-être collectif liées à la sous-tarifification actuelle des routes urbaines ?

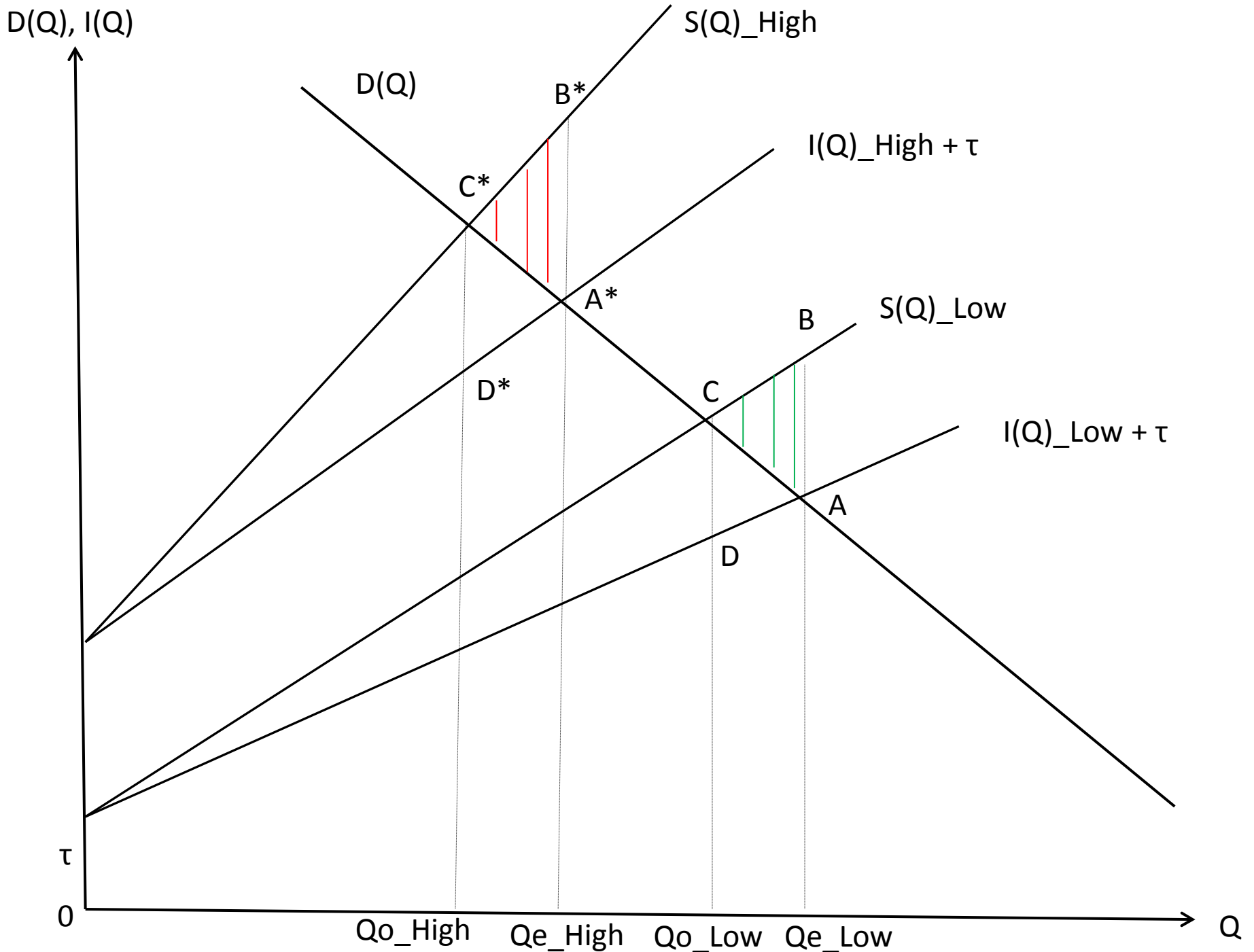
Dans ce travail (en cours)

- On répond à ces questions théoriques classiques :
 - En couplant 3 outils de modélisation numérique
 - Freturb (pour le TMV)
 - Modus (pour l'affectation du trafic)
 - Copcete (pour les émissions de polluants)
 - Pour le cas des routes d'Ile-de-France (ordres de grandeur pertinents pour alimenter les débats)



Attention

- Cette représentation occulte deux phénomènes :
 - Il y a en réalité plusieurs classes de véhicules sur les routes : la fonction de coût privé $I(Q)$ d'une VP dépend aussi des flux de PL et de VUL
 - Les externalités environnementales peuvent être fonction des flux de véhicules, via les relations existantes entre trafic, vitesse et émissions
- Ces oublis peuvent donc influencer Q_0 , CD et ABC



Stratégie empirique

- 1) On mobilise Freturb (LAET) afin d'estimer une matrice OD pour les VUL/PL en IDF (à la commune)
- 2) On utilise une matrice OD pour les VP et on détermine l'affectation d'équilibre sur le réseau (MODUS)
- 3) On obtient les coûts privés et externes (Copcete) des VP/VUL/PL dans le benchmark
- 4) On ajuste les matrices OD de +/-10% et de +/-25% (séparément et conjointement) et on réaffecte à chaque fois le trafic sur le réseau
- 5) On calibre les fonctions de coûts et de demande inverse avec les résultats des 125*3 simulations (+ élasticités)
- 6) On réalise l'analyse de bien-être (+ tests de sensibilité)

Modéliser le fret, via Freturb

- Les mouvements de marchandises dans la zone z (M_z) dépendent du nombre d'établissements du secteur a , de leur taille p et de leurs locaux o (SIRENE)
- La combinaison de ces caractéristiques définit un type d'établissements ε ayant ses propres attributs logistiques (véhicule = k , gestion = m et trajets = r) :

$$M_z = \sum_{\varepsilon \in \mathcal{E}_z} n_{\varepsilon}(a, p, o) = \sum_{\varepsilon, k, m, r} M_{\varepsilon, z} \times f_{k, m, r}(\varepsilon)$$

- Freturb calcule alors les distances parcourues dans chaque zone et distribue les mouvements de marchandises entre les zones (logique gravitaire principalement)
- On obtient au final une matrice OD pour les PL et les VUL

Modéliser l'affectation, via Modus

- Principe de Wardrop : à l'équilibre, les conducteurs sont indifférents entre les différents itinéraires possibles (équilibre de Nash)
- La fonction de coût généralisé d'une classe d'utilisateurs k comporte différentes valeurs du temps (individus, chargeurs, transporteurs) :

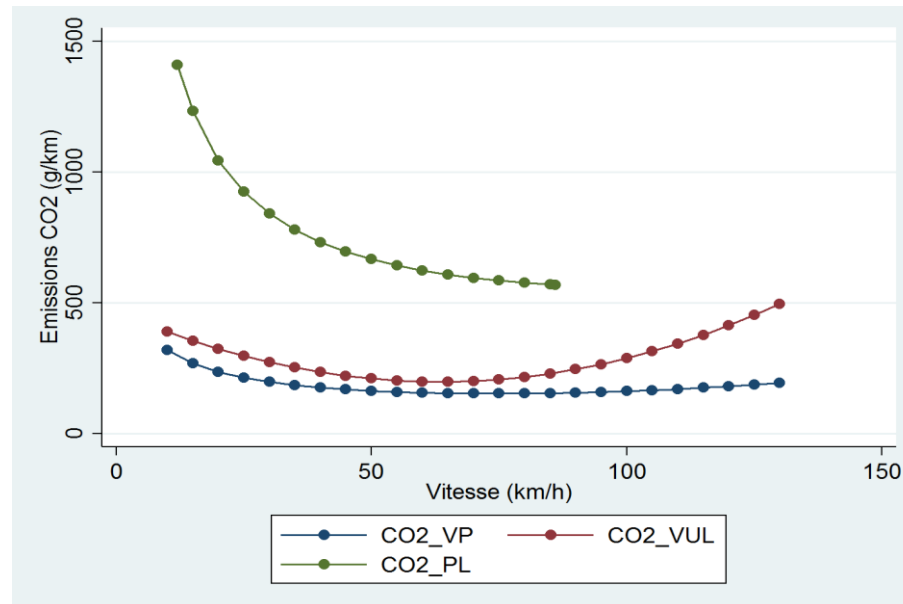
$$CG_k = (m_k + \tau_k) + TT_k (\alpha_k^i w_k^i + \alpha_k^c w_k^c + w_k^t)$$

- Fonction de congestion multi-classes (tronçon z) :

$$TT_z = TT_{0z} \left(1 + \alpha_z \left(\frac{Q_{1z} + \gamma_2 Q_{2z} + \gamma_3 Q_{3z}}{K_z} \right)^{\beta_z} \right)$$

Modéliser les émissions, via Copcete

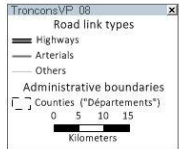
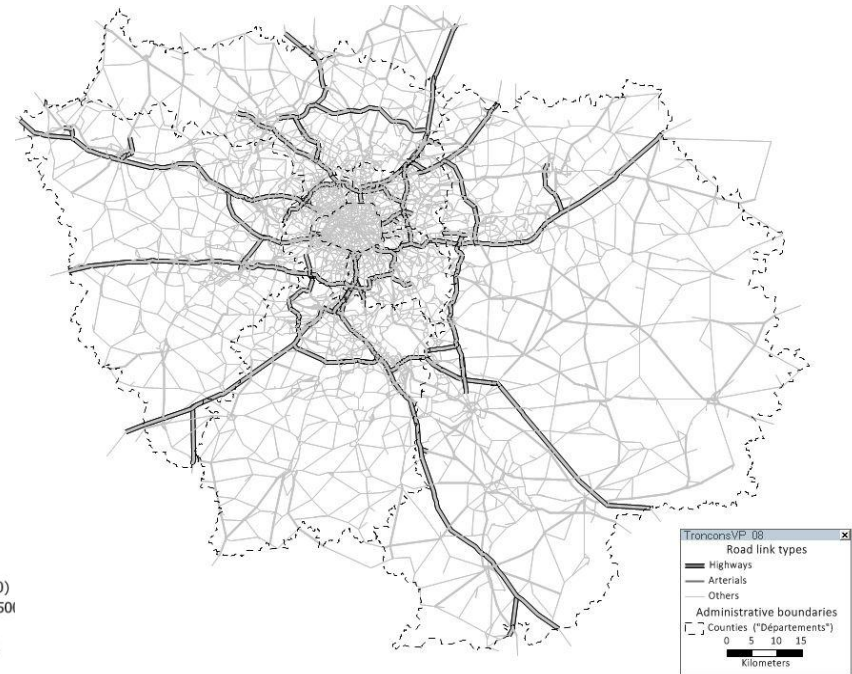
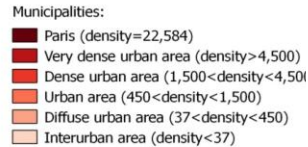
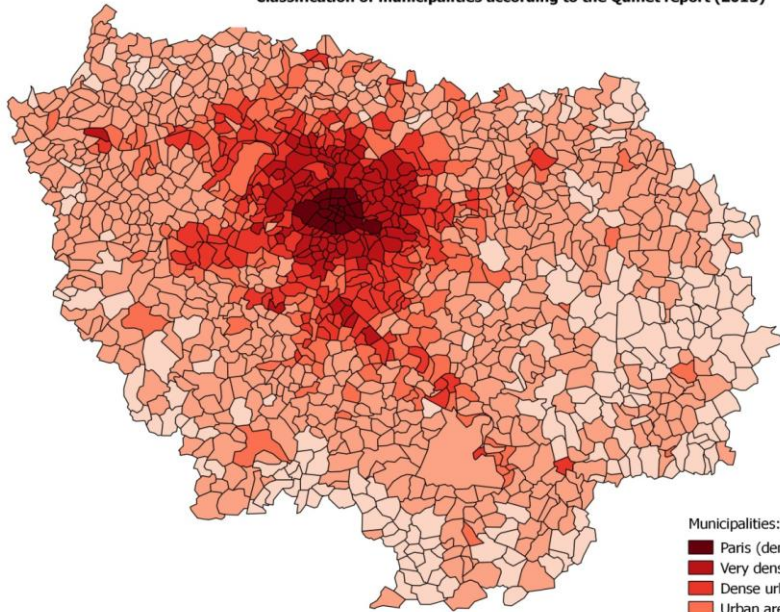
- Outil développé par le CEREMA (Copert 4)
- Les émissions de polluants sont fonction des types de véhicules et des vitesses moyennes :



- On considère ici CO₂, PM₁₀, NO_x and SO₂
- Monétarisation via les valeurs Quinet (2013)

La région IDF

Classification of municipalities according to the Quinet report (2013)



- Informations sur populations et entreprises (SIRENE)
- Réseau routier de 21000 km (fonction BPR par tronçon)
- Coûts d'entretien variables selon les tronçons, coûts des nuisances sonores/PM_{2.5} variables selon la densité (CGSP,2013)
- « Parc urbain » de Copcete

Résultats de Freturb

- Le fichier SIRENE permet de simuler les besoins de transport de fret au niveau communal :
 - Coefficient de génération moyen = 6,3 opérations/semaine/firme
(= 5,08 M mouvements/semaine = 893000 mouvements/jour)
 - Coefficient plus faible dans Paris car présence de nombreux bureaux et d'activités de services
 - Corrélation positive entre tournées et densité de population
 - Recours plus fort au compte propre dans les espaces ruraux car beaucoup d'établissements avec peu de salariés

Table 3 – Characteristics of freight operations

	IdF	PC	VDUA	DUA	UA	DIUA	IA
Operations per establishment (/week)	6.3	4.9	6.6	7.5	8.8	7.1	5.1
Direct trips movements (%)	29.8	26.9	28.4	29.4	30.1	34.2	50.7
Third party operators movements (%)	41.2	40.2	41.4	41.7	44.1	39.7	31.1

Matrice OD (HPM)

- Environ 1,2 M de voyages/heure de pointe du matin
- Fret = 6,5% des flux régionaux (57% par VUL)
- Fret bien plus concentré dans le centre (vs. VP plus diffus)

**Table 4 - Aggregate OD matrix during the morning peak
(number of vehicle trips and % of total)**

<i>Private cars</i> <i>Vans</i> <i>Trucks</i>	Very high density areas (Paris + Very dense urban area)	Lower density areas (Others)	Total
Very high density areas (Paris + Very dense urban area)	439,002 (39%) 23,253 (51%) 15,228 (45%)	108,713 (10%) 6,615 (15%) 5,298 (16%)	547,716 (48%) 29,868 (66%) 20,526 (61%)
Lower density areas (Others)	115,688 (10%) 6,615 (15%) 5,298 (16%)	466,278 (41%) 8,831 (19%) 7,917 (23%)	581,966 (52%) 15,445 (34%) 13,215 (39%)
Total	554,690 (49%) 29,868 (66%) 20,526 (61%)	574,992 (51%) 15,445 (34%) 13,215 (39%)	1,129,628 (100%) 45,313 (100%) 33,741 (100%)

Paramètres

Table 5 - Cost parameters (2012)

	Private cars	Vans	Trucks
Monetary costs (€/km)	0.262	0.238	0.530
<i>Including specific taxes (€/km)</i>	<i>0.083</i>	<i>0.084</i>	<i>0.176</i>
Vehicle occupancy rate (individuals)	1.3	1.0	1.0
Vehicle load weight (tons)	0.0	0.3	1.9
Individuals' value of time (€/h)	11.0	18.5	18.5
Carriers' value of time (€/h)	0.0	0.6	0.6
Transport operators' value of time (€/h)	0.0	3.1	12.4
CO₂ (€/ton)		35.8	
PM_{2.5} (€/gram)		0.017 - 4.595	
NO_x (€/gram)		0.009	
SO₂ (€/gram)		0.009	
Noise (€/km)	0.001-0.0004	0.001-0.0004	0.027-0.0001
Road damages (€/km)	0.004-0.015	0.017-0.007	0.132-0.038
Life cycle effects (€/km)	0.009	0.012	0.031
Private cars equivalency factors	1.0	1.5	2.0

Sources: Quinet (2013) and MEDDE (2014)

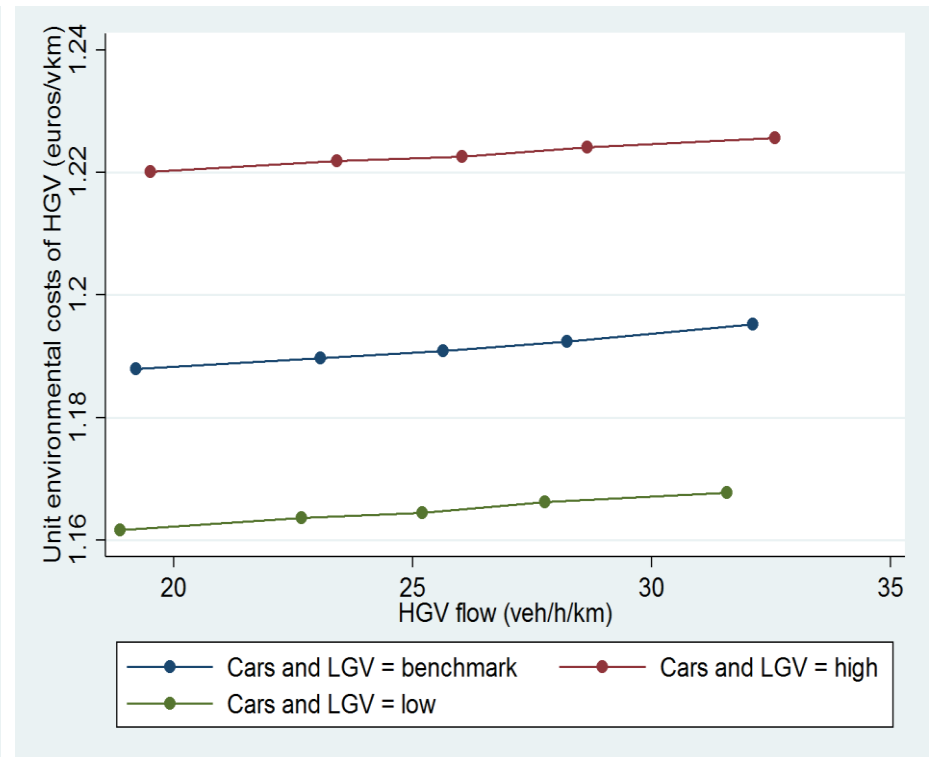
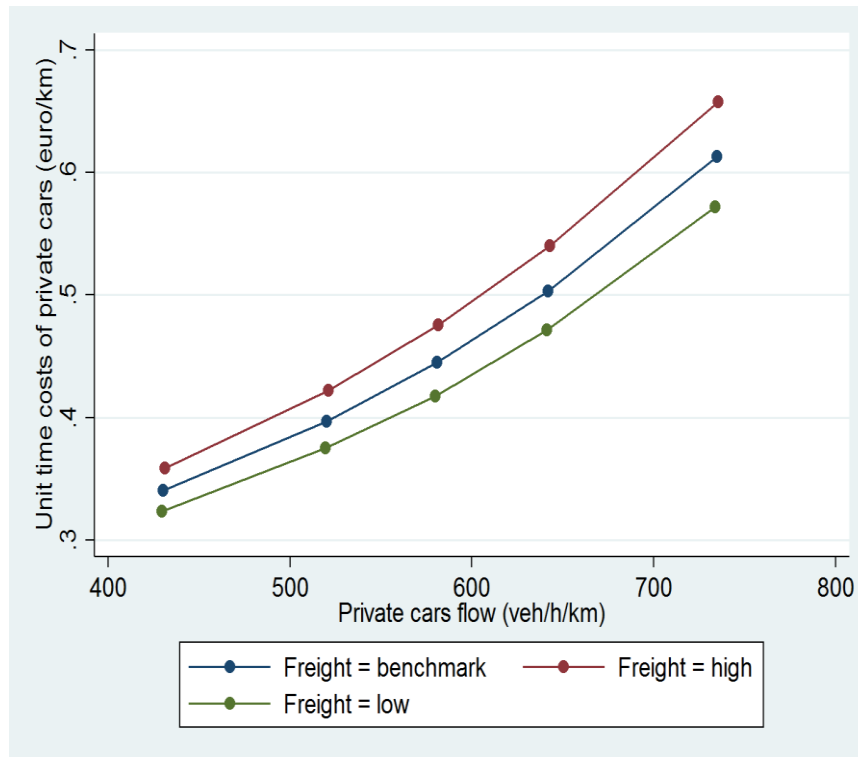
Coûts privés et externes actuels

- Pour une journée complète de 2012 :

	Cars	LDV	HGV	Total	Freight
Road traffic (Mvkm/day)	124.898	5.942	5.057	135.897	8.1%
Money costs (M€/day)	32.723	1.414	2.680	36.818	11.1%
<i>Including taxes (M€/day)</i>	6.120	0.214	0.718	7.052	13.2%
Time costs (M€/day)	37.904	2.973	3.584	44.461	14.7%
CO2 (M€/day)	0.774	0.055	0.127	0.956	19.0%
Local pollutants (M€/day)	10.764	1.092	5.491	17.346	37.9%
Noise (M€/day)	0.131	0.007	0.047	0.185	29.2%
Road damages (M€/day)	1.089	0.061	0.271	1.421	23.4%
Life cycle effects (M€/day)	1.169	0.070	0.156	1.395	16.2%
Total external costs (M€/day)	13.927	1.284	6.092	21.304	34.6%
Total social costs (M€/day)	78.434	5.458	11.638	95.530	17.9%
External costs coverage rate	43.9%	16.7%	11.8%	33.1%	12.6%

Les 375 simulations

- On observe une relation positive (et linéaire) entre flux de véhicules, coûts unitaires temporels et coûts unitaires environnementaux (CO₂, NO_x, PM_{2.5}, SO₂, bruit, LCE)
- On peut calibrer les fonctions de coûts privés et externes



Optimum de premier rang (1)

		Benchmark			First-Best		
		Off.	Morn.	Even.	Off.	Morn.	Even.
Traffic flows (veh/h/km)	C	227.7	580.8	572.3	180.0 (-21.0%)	492.4 (-15.2%)	480.6 (-16.0%)
	L	12.4	30.3	11.9	10.9 (-12.2%)	24.8 (-18.2%)	9.5 (-20.0%)
	H	10.5	25.6	10.4	8.1 (-23.1%)	19.7 (-23.1%)	7.8 (-25.2%)
Taxes (€/km)	C	0.049	0.049	0.049	0.212 (331.8%)	0.384 (683.5%)	0.349 (612.4%)
	L	0.036	0.036	0.036	0.704 (1,855.7%)	1.511 (4,097.9%)	1.328 (3,589.0%)
	H	0.142	0.142	0.142	1.754 (1,135.0%)	2.743 (1,831.4%)	2.517 (1,672.6%)
Social Welfare (M€/period)		36.6	28.9	19.9	39.0 (6.4%)	30.1 (4.4%)	20.8 (4.4%)
Drivers surplus (M€/period)	C	24.1	21.6	15.5	15.0 (-37.5%)	15.5 (-28.1%)	13.1 (-29.5%)
	L+H	21.7	10.3	6.5	14.4 (-33.4%)	6.5 (-37.5%)	2.0 (-40.6%)
Environmental costs (M€/period)	C	-7.8	-2.6	-2.2	-6.1 (-21.4%)	-2.2 (-16.1%)	-2.1 (-16.7%)
	L+H	-4.9	-1.5	-1.2	-3.8 (-21.6%)	-1.2 (-23.2%)	-0.5 (-25.1%)
Public finance (M€/period)	C	3.1	1.0	7.8	12.3 (297.2%)	7.8 (692.8%)	6.9 (613.1%)
	L+H	0.4	0.1	3.5	7.1 (1,607.6%)	3.8 (2,853.7%)	1.3 (2,478.8%)

Optimum de premier rang (2)

- Bien-être collectif : +4.5M€/jour (+5.3%; 0.2% du PIB régional)
- Il faudrait de fortes hausses des taxes/baisses des vkm :
 - 0.243 €/VPkm (x5) → -18.9% in VPkm
 - 0.847 €/VULkm (x23.5) → -14.2% in VULkm
 - 1.929 €/PLkm (x13.6) → -23.3% in PLkm
- Gains environnementaux conséquents (+4.1M€/jour) :
 - Essentiellement un effet direct (baisse des vkm)
 - Quelques effets indirects (le coût unitaire baisse de 2%)
- D'importants transferts de surplus économique à neutraliser :
 - Pertes pour les usagers des routes : -33.1M€/jour
 - Gains pour les finances publiques : +33.5M€/jour
- Contribution du fret au bien-être collectif (8-9% des vkm) :
 - Surplus des conducteurs : 39% actuellement → 34% à l'optimum
 - Coûts environnementaux : 38% → 35%
 - Part dans les finances publiques : 25% → 31%

Tests de sensibilité (HPM)

- Elasticités de benchmark : $\varepsilon_C = -0.4$, $\varepsilon_L = \varepsilon_H = -0.2$, $\varepsilon_{L/H} = 0.05$
- Les taxes optimales ne sont presque pas sensibles aux hypothèses faites sur les élasticités demande-CG, contrairement aux variations de bien-être collectif

		FB	Assumptions on demand elasticities:			
			$\varepsilon_C = -0.6$	$\varepsilon_L = -0.3$	$\varepsilon_{L/H} = 0.0$	$\varepsilon_{L/H} = 0.1$
Traffic flows (veh/h/km)	C	492.4	-6.3%	+0.5%	+0.6%	-0.6%
	L	24.8	+1.6%	-14.9%	-8.5%	+8.5%
	H	19.7	+1.0%	+0.5%	-7.6%	+8.1%
Taxes (€/km)	C	0.384	-3.6%	-0.5%	-0.5%	+0.5%
	L	1.511	-4.1%	-0.8%	-0.9%	+1.0%
	H	2.743	-2.8%	-0.5%	-0.7%	+0.7%
Social Welfare (M€/period)		30.1	-22.9%	-6.3%	-8.0%	+16.6%

Optimum de second rang (HPM)

- H : on ne peut pas changer les taxes pour certains véhicules
- La « meilleure » option, dans une optique de bien-être collectif, pourrait consister à ne taxer que les petits véhicules
- La « pire » option serait de ne taxer que les PL
- Analyses à approfondir cependant

		Benc.	FB	No change in taxes for:			
				C	L+H	H	C+L
Traffic flows (veh/h/km)	C	580.8	-15.2%	+1.3%	-16.5%	-16.1%	+0.6%
	L	30.3	-18.2%	-19.0%	+1.2%	-16.2%	+6.9%
	H	25.6	-23.1%	-23.9%	+0.9%	+5.5%	-25.9%
Taxes (€/km)	C	0.049	x 7	x 1	x 7	x 7	x 1
	L	0.036	x 41	x 40	x 1	x 26	x 1
	H	0.142	x 19	x 18	x 1	x 1	x 15
Social Welfare (M€/period)		28.9	+4.4%	+1.8%	+2.6%	3.2%	+0.7%

Conclusions

- Sous-tarification des routes et pertes de bien-être : question très classique en sciences économiques
- Le couplage de modèles numériques permet d'enrichir significativement le modèle théorique car :
 - Prise en compte des flux de PL et de VUL (rare)
 - Interactions sur les routes entre VP et véhicules de fret
 - Les coûts environnementaux (et donc les taxes optimales) dépendent de ces deux points précédents
- D'autres couplages seraient possibles :
 - Dispersion des / exposition aux polluants locaux
 - Vitesse, flux et nuisances sonores
 - Dépenses pour l'entretien des routes