

# Projet Decarbonation As A Service : Principaux résultats

*(work in progress, please do not quote)*

Lucie Letrouit, Martin Koning, François Combes, Anicet Kabre

*Séminaire SPLOTT, Novembre 2023*

# Contexte

- Transports = 29% des émissions de GES de la France  
Transports PL = 7% des émissions de GES de la France
- 70% des distances parcourues par les PL le sont sur autoroute
- Résultats mitigés des politiques de report modal du transport de fret (et, même si les objectifs sont atteints, 70% des tkm resteront sur les routes)
- Les sociétés concessionnaires d'autoroutes (SCA) ont envie de décarboner leurs activités en scope 3

⇒ Raisonnable de supposer que “la route du développement durable passe par le développement des routes durables”

# Objectifs

Vinci Autoroutes a missionné SPLOTT, via le Lab Recherche Environnement, pour étudier la pertinence socio-économique d'un service de navettes décarbonées permettant de transporter du fret sur un corridor de son réseau

En pratique :

- Modèle analytique pour déterminer divers schémas de tarification d'accès au service de navettes
- Calibration empirique du modèle pour différentes technologies et différents horizons temporels
- Recommandations de politiques publiques

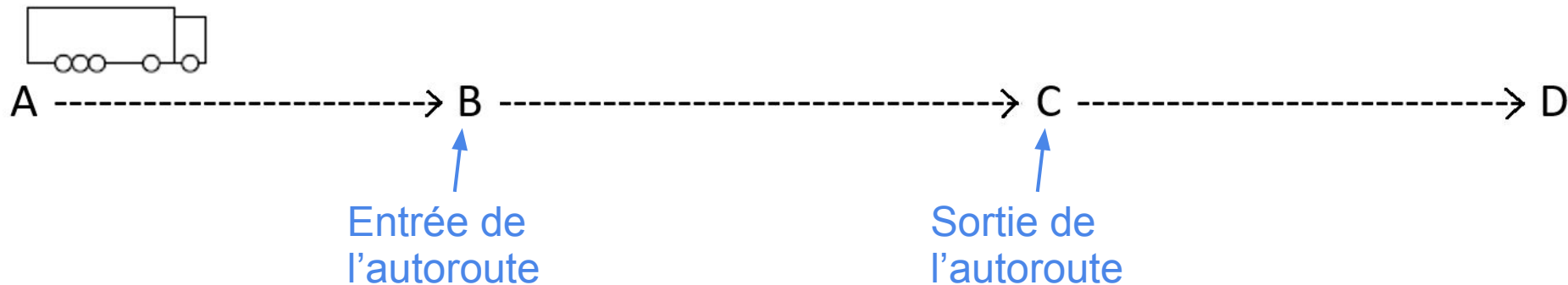
# Schéma du service

Transport de la remorque par :

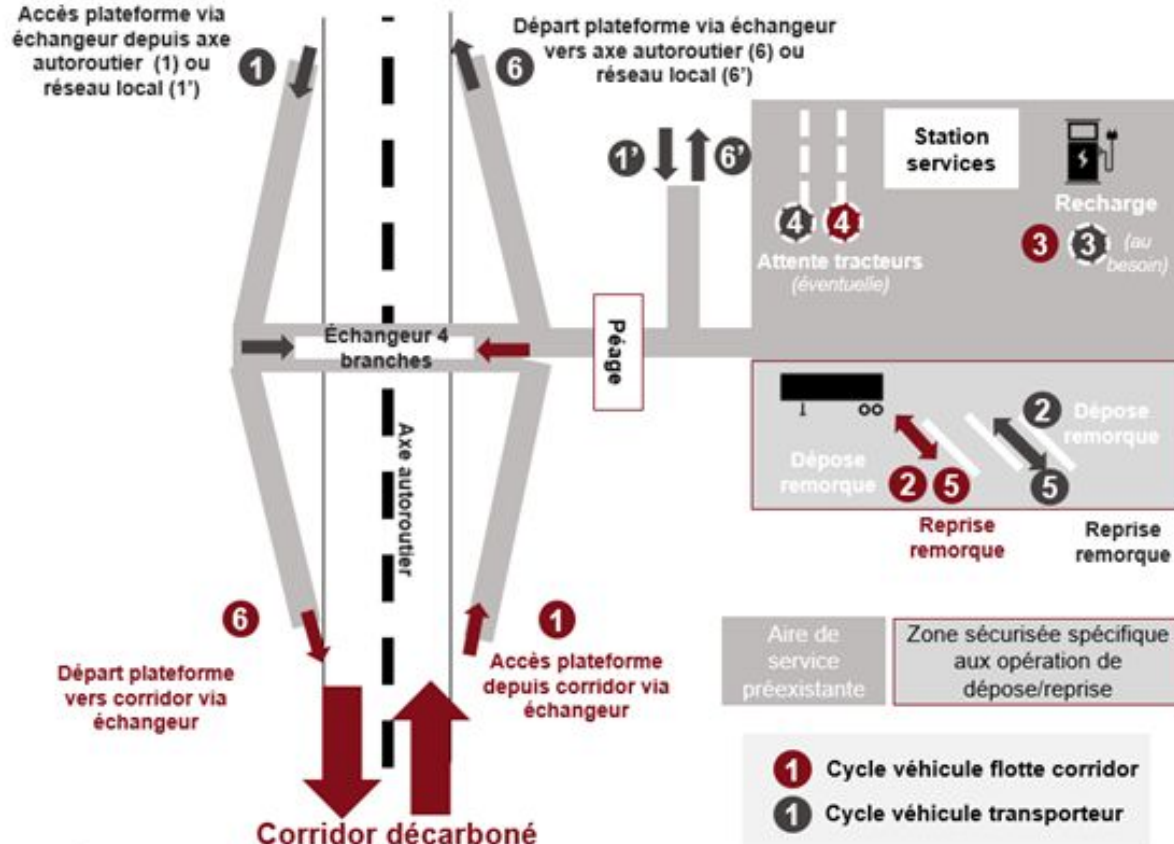
**Tracteur diesel 1**

**Navette décarbonée**

**Tracteur diesel 2**



# Le service de navettes envisagé (source : Mensia)



# Schémas de tarification étudiés

2 cas théoriques : le tarif d'accès au service ( $p_1$ ) est déterminé :

- par la SCA qui **maximise son profit total** (optimum privé) :

$$\pi = \underbrace{(1 - \tau_0)p_0Q_0 + (1 - \tau_1)p_1Q_1}_{\text{Recettes après impôt}} - \underbrace{I_1}_{\text{Coût de production du service}} - \underbrace{u(Q_0 + Q_1)}_{\text{Usure de la route}}$$

- par un “planificateur bienveillant” qui **maximise le social welfare** (optimum collectif de 1st-best) :

$$SW = \pi - \underbrace{Q_0CG_0 + Q_1CG_1}_{\text{Coûts généralisés pour les transporteurs}} + \underbrace{\alpha FP}_{\text{Finances publiques}} - \underbrace{Q_0E_0 + Q_1E_1}_{\text{Coûts environnementaux}}$$

# Schémas de régulation associés

On envisage (pour l'instant) deux modalités d'intervention publique :

- Une **subvention kilométrique** visant à maximiser le bien-être collectif, étant donnée la stratégie de tarification de l'opérateur privé qui détermine le prix du service en maximisant son propre profit : optimum collectif de 2nd-best
- Une **subvention fixe** visant à compenser les pertes de la SCA au cas où l'optimum privé ne lui serait pas profitable : modèle actuel des contrats de concession

# Impacts pour les usagers du service (i.e. transporteurs)

Fonctions de coût généralisé:

- Quand le transporteur n'utilise pas le service de navettes (indice 0)

$$CG_0 = \underbrace{c_d d_{AD}}_{\text{Coût lié aux distances parcourues}} + \underbrace{p_0 d_{BC}}_{\text{Péage autoroute}} + \underbrace{(c_w + c_k + c_g)(t_{AD} + t_{break})}_{\text{Coûts liés à la durée d'utilisation, amortissement du capital et immobilisation marchandises}}$$

Coût lié aux distances parcourues

Péage autoroute

Coûts liés à la durée d'utilisation, amortissement du capital et immobilisation marchandises

- Quand le transporteur utilise le service (indice 1)

$$CG_1 = c_d(d_{AB} + d_{CD}) + \underbrace{p_1 d_{BC}}_{\text{Coût service de navettes}} + (c_w + c_k + c_g)(t_{AB} + t_{CD}) + c_g(t_{CD} + 2t_{load})$$

Coût service de navettes

Fonction de demande pour le service de navettes :

$$Q_1 = a - b(CG_1 - CG_0)$$



# Impacts pour le fournisseur du service

Coût de production du service (pour une technologie  $\theta$ ) :

$$I_1^\theta = \underbrace{(c_k^\theta t_C^\theta + c_w(t_R + t_{BC}) + c_d^\theta d_{BC})Q_1^\theta}_{\text{Coûts liés à l'amortissement du capital, durée d'utilisation, et distance parcourue}} + \underbrace{K_P}_{\text{Coût fixe de plateforme}} + \underbrace{(k_P(t_R + t_L^\theta) + k_L^\theta t_L^\theta)Q_1^\theta}_{\text{Coût de plateforme}} \quad \begin{array}{l} \text{Coûts places de} \\ \text{stationnement} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Coûts installations} \\ \text{de recharge des} \\ \text{navettes} \end{array}$$

Le modèle analytique de production permet également de conclure que :

- la flotte est dimensionnée pour répondre à la demande des pointes
- les capacités de stationnement pour la demande des creuses

# Technologies considérées

Le PL de référence est un Euro 6 Diesel

Les navettes seront alimentées en électricité, biogaz ou hydrogène

Pour les PLE, 4 configurations :

- Recharge statique avec une autonomie de 400km
  - Rapide = en 1h
  - Lent = en 4h
- Recharge dynamique via ERS :
  - 70% du corridor équipé et batteries intermédiaires (autonomie de 200km)
  - 100% du corridor équipé et petites batteries (20km)

# Données principales pour la calibration

Attention : certains paramètres pas encore stabilisés

	<b>Diesel</b>	<b>E. Rap</b>	<b>E. Lent</b>	<b>GNV</b>	<b>Hydro</b>	<b>ERS</b>	<b>ERS 2</b>
<b>Consommation (#/km)</b>	0,300	1,300	1,300	0,270	0,089	1,300	1,300
<b>Prix HT énergie (€/#)</b>	0,440	0,117	0,117	0,810	9,300	0,117	0,117
<b>Taxes énergie (€/#)</b>	0,452	0,023	0,023	0,077	0,000	0,023	0,023
<b>Prix TTC énergie (€/#)</b>	0,892	0,140	0,140	0,887	9,300	0,140	0,140
<b>Maintenance (€/km)</b>	0,078	0,055	0,055	0,091	0,055	0,055	0,055
<b>Prix achat véhicule (€)</b>	85000	200000	200000	110500	255000	140000	125000
<b>Subvention achat (€)</b>	0	50000	50000	0	50000	50000	50000
<b>Suramortissement (%)</b>	0	40	40	40	40	40	40
<b>Emissions usage (g/km)</b>	837	57	57	130	250	57	57
<b>Autres émissions (g/km)</b>	66	103	103	26	56	51,5	25,75
<b>Coût stations (M€)</b>	0	0,42	0,08	1,03	6,3	0,42	0,42
<b>Autres inv. (M€)</b>	0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5 + 3/km	1,5 + 3/km

# Autres données importantes

Corridor de 320 km avec un flux moyen de 350 PL/h (2 x 50 km en amont et aval)

Le service de navettes fonctionne 230 j/an et 24h/j (contre 10h/j en référence)

Une pause de 45 minutes nécessaire si on roule plus de 4h30 minutes

Le salaire d'un conducteur de navettes est 20 eu/h (24 eu/h en référence)

Le péage classique sur autoroute est de 0,11 eu/km

On suppose qu'il faut 2 x 30 minutes pour charger / décharger la remorque

On valorise le CO<sub>2</sub> à 150 eu/tonne

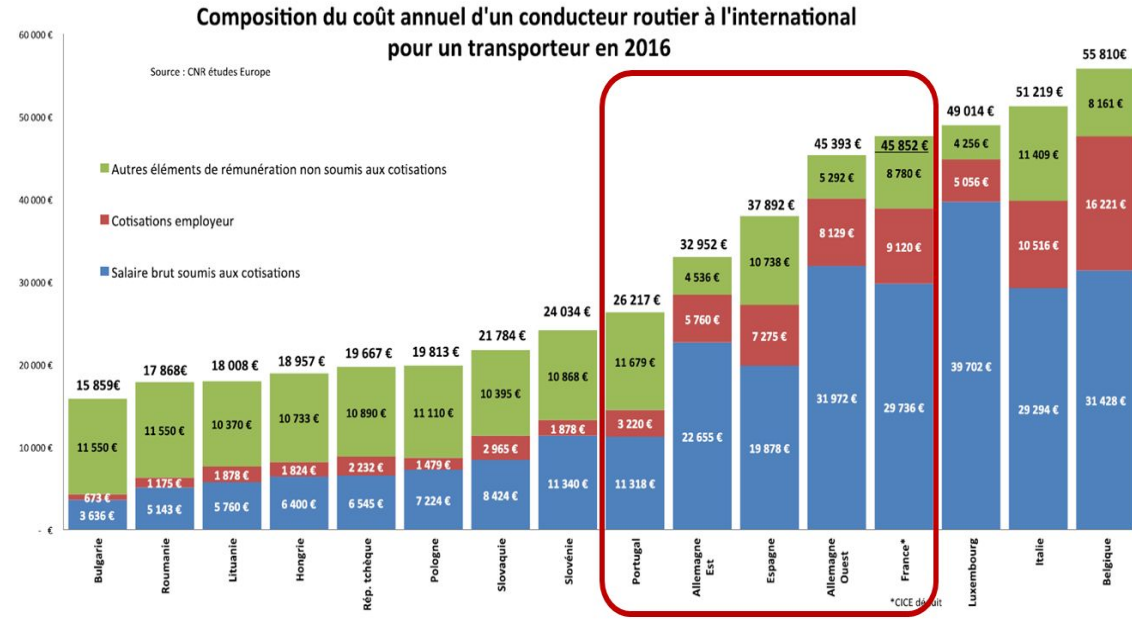
# Calibration de la fonction de demande ( $a = -130$ ; $b = 4,5$ )

$$Q_1 = a - b(CG_1 - CG_0)$$

On suppose que :

- si le coût du service est égal au coût du routier français : 0% de demande
- si le coût est égal au coût de référence du routier portugais : 100%

On ajoute une pénalité de 30 euros à la solution décarbonée (autoroutes ferroviaires)



Comparatif des conditions d'emploi et de rémunération des conducteurs routiers internationaux en Europe, CNR (2016)

# Résultats - Optimum privé (1)

Rq : Formes analytiques des prix du service de navettes non triviales

	<b>Diesel</b>	<b>E. Rap</b>	<b>E. Lent</b>	<b>GNV</b>	<b>Hydro</b>	<b>ERS</b>	<b>ERS 2</b>
<b>Prix service (€/km)</b>	na	0,790	0,800	0,800	0,800	0,763	0,756
<b>Q1 (veh/h)</b>	0	14	0	0	0	53	63
<b>Q0 (veh/h)</b>	350	336	350	350	350	297	287
<b>Flotte de navettes</b>	0	114	0	0	0	406	463
<b>Places de parking pur</b>	0	76	0	0	0	273	314
<b>Bornes (avec place associée)</b>	0	16	0	0	0	30	15
<b>Profit joint (€/h)</b>	7616	7647	7616	7616	7616	1669	-878
<b>CO2 émis (tonnes/h)</b>	133	129	133	133	133	119	116
<b>Social welfare (k€/h)</b>	-136,1	-135,5	-136,1	-136,1	-136,1	-139,4	-141,2
<b>Coût abattement (€/tonne)</b>	na	-11,4	na	na	na	402,1	462,9

# Résultats - Optimum privé (2)

Si la SCA fixe le prix du service en maximisant son profit :

- Seule option viable sans subvention = électrique avec recharge rapide  
MAIS capte uniquement 4% de la demande et peu de gains de CO2
- Les options ERS pourraient capter une part non négligeable de la demande (17%) et réduire le CO2 de 10%  
MAIS leurs forts coûts fixes engendrent des pertes pour la SCA qui doivent être compensées

## Résultats - Optimum collectif de 1st-best (1)

	<b>Diesel</b>	<b>E. Rap</b>	<b>E. Lent</b>	<b>GNV</b>	<b>Hydro</b>	<b>ERS</b>	<b>ERS 2</b>
<b>Prix service (€/km)</b>	na	0,557	0,557	0,557	0,800	0,557	0,557
<b>Q1 (veh/h)</b>	0	350	350	350	0	350	350
<b>Q0 (veh/h)</b>	350	0	0	0	350	0	0
<b>Flotte de navettes</b>	0	2900	4100	2583	0	2700	2583
<b>Places de parking pur</b>	0	1940	2660	1750	0	1820	1750
<b>Bornes (avec place associée)</b>	0	400	1600	83	0	200	83
<b>Profit joint (€/h)</b>	7616	-16727	-22700	-22716	7616	-17400	-18665
<b>CO2 émis (tonnes/h)</b>	133	50	50	49	133	44	41
<b>Social welfare (k€/h)</b>	-136,1	-122,6	-130,6	-127,8	-136,1	-121,6	-122,2
<b>Coût abattement (€/tonne)</b>	na	-12,3	84,0	51,2	na	-12,3	-1,2



# Résultats - Optimum collectif de 1st-best (2)

Si le prix du service est déterminé afin de maximiser le bien-être collectif :

- Toutes les options devraient capter 100% de la demande, sauf les PL hydrogènes qui ne sont pas une option viable

Gains de social welfare de 10%, avec des économies de CO2 de 65%, conduisant à des coûts d'abattement négatifs ("double-dividende")

MAIS : La SCA devrait accepter des pertes de profits conséquentes (peu crédible)

## Résultats - Optimum collectif de 2nd-best (1)

	Diesel	E. Rap	E. Lent	GNV	Hydro	ERS	ERS 2
<b>Subvention (€/km)</b>	na	0,291	0,142	0,203	-1,153	0,429	0,471
<b>Prix service (€/km)</b>	na	0,640	0,745	0,713	0,800	0,557	0,557
<b>Q1 (veh/h)</b>	0	230	80	125	0	350	350
<b>Q0 (veh/h)</b>	350	120	270	225	350	0	0
<b>Flotte de navettes</b>	0	1905	934	922	0	2700	2583
<b>Places de parking pur</b>	0	1274	606	625	0	1820	1750
<b>Bornes (avec place associée)</b>	0	263	364	30	0	200	83
<b>Profit joint (€/h)</b>	7616	18999	8977	10971	7616	30647	34134
<b>CO2 émis (tonnes/h)</b>	133	78	114	103	133	44	41
<b>Social welfare (k€/h)</b>	-136,1	-131,5	-135,5	-134,7	-136,1	-131,2	-132,7
<b>Delta finances publiques (k€/h)</b>	0	-38,9	-9,3	-15,6	0	-77,3	-82,7
<b>Coût abattement (€/tonne)</b>	na	65,5	121,1	104,5	na	95,7	113,7

## Résultats - Optimum collectif de 2nd-best (2)

Avec une subvention kilométrique qui vise la maximisation du bien-être collectif :

- Les ERS pourraient capter 100% de la demande

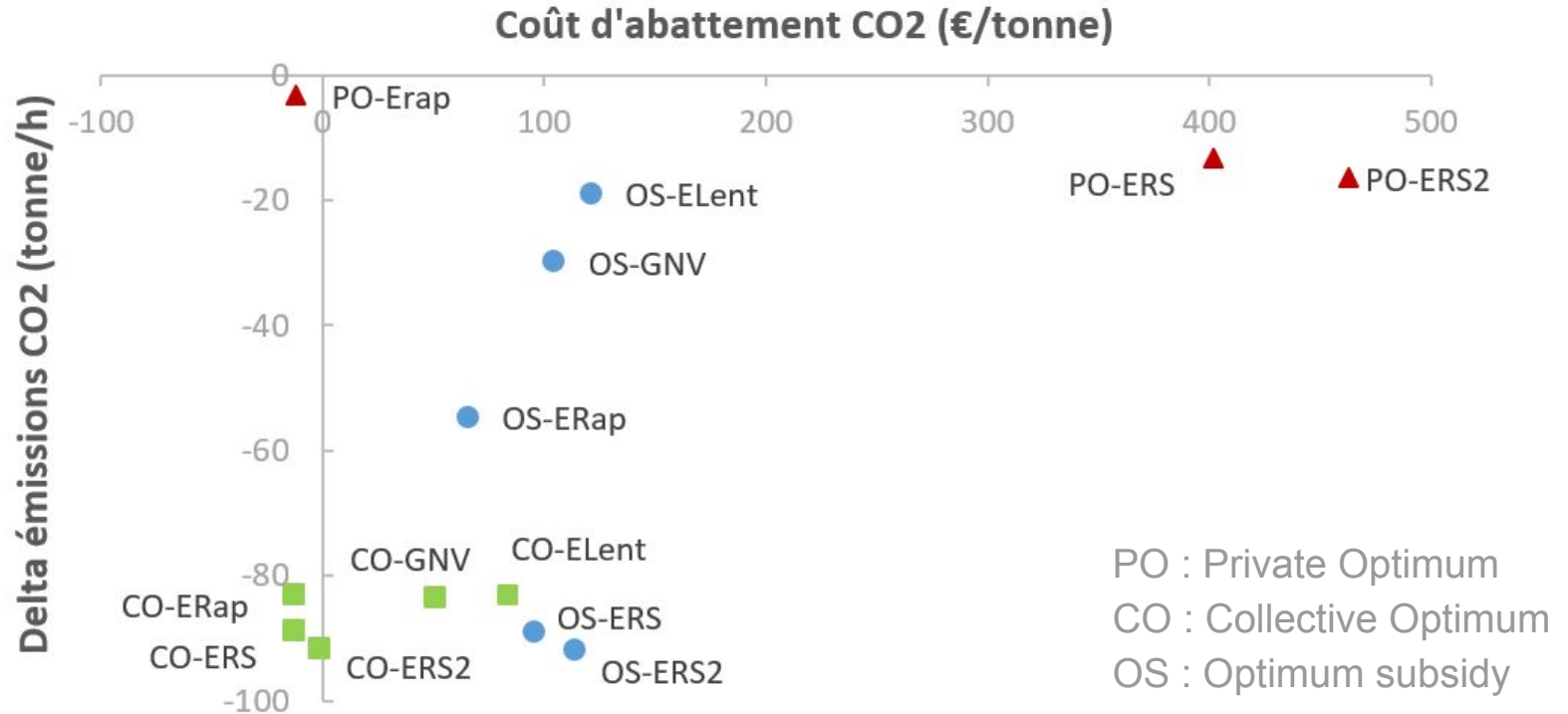
MAIS besoin d'une aide publique  $> 0,4$  eu/km (fort transfert entre l'Etat et la SCA qui verrait son profit exploser)

- L'option PL électrique avec recharge rapide pourrait capter 40% de la demande avec une subvention  $< 0,30$  eu/km

D'après le **critère du coût d'abattement** : toutes les options sont justifiées (car  $CA < 150$  eu/tonne) ET PL électrique rapide est la meilleure solution

D'après le **critère de CO2 économisé** : ERS 2 est la meilleure solution

# Pour synthétiser (1)



## Pour synthétiser (2)

- Navettes hydrogènes : JAMAIS une bonne option
- Les optimums collectifs de 1st-best conduisent à des parts de marché de 100% et à des CA négatifs MAIS configurations peu crédibles
- Sans intervention publique, seule l'électrique rapide peut être pertinente du point de vue des SCA, mais les bénéfices collectifs très modestes
- Une subvention kilométrique (entre 0,3 et 0,4 eu/km) pour les options recharges statiques rapides ou ERS semble constituer un bon compromis entre gains de CO2 et coûts pour la collectivité
- Dans l'optique d'un contrat de concession, une aide forfaitaire pour les ERS ne semble pas justifiée (car les pertes pour les finances publiques > gains pour la SCA, en raison du COFP)

# Quid à l'horizon 2040 ? (1)

Pour les options diesel, électrique rapide et ERS, on suppose :

- Coût des PL diesel + 10% vs. coût des PL électriques - 30%
- Consommation des PL diesel -25% vs. consommation des PL électriques -10%  
(mêmes baisses pour les émissions à l'usage du véhicule)
- Prix TTC diesel +70% vs. prix TTC de l'électricité +40%
- Coût kilométrique ERS et coût des chargeurs rapides -20%
- Valeur du CO2 → 450 eu/tonne

	Diesel	E. Rap	ERS	ERS 2
<i>Optimum privé</i>				
Prix service (€/km)	na	0,832	0,803	0,808
Q1 (veh/h)	0	71	113	105
Profit joint (k€/h)	7,6	8,7	4,7	1,8
CO2 émis (tonnes/h)	102	90	81	81
Social welfare (k€/h)	-167,5	-160,6	-159,1	-162,6
Delta finances publiques (k€/h)	na	-4,6	-7,2	-6,6
Coût abattement (€/tonne)	na	-108,9	59,2	213,1
<i>Optimum collectif de 2nd-best</i>				
Subvention (€/km)	na	0,695	0,881	0,888
Prix service après subvention (€/km)	na	0,638	0,638	0,638
Q1 (veh/h)	0	350	350	350
Profit joint (k€/h)	7,6	69,8	91,3	88,3
CO2 émis (tonnes/h)	102	42	36	33
Social welfare (k€/h)	-167,5	-149,4	-149,5	-152,1
Delta finances publiques (k€/h)	na	-117,0	-141,2	-142,1
Coût abattement (€/tonne)	na	150,4	178,4	226,6

## Quid à l'horizon 2040 ? (2)

A moyen-terme, le service de navettes pourrait capter entre 20% et 30% de la demande sans aide publique directe (Rq : on suppose que les subventions à l'achat des véhicules subsistent)

Meilleures améliorations du social welfare avec une mise en place de la subvention kilométrique : coûteuse pour l'Etat mais gains pour la SCA, les transporteurs et l'environnement

Dans tous les cas, CA < 450 eu/tonne



# Pour améliorer l'analyse

Intégrer :

- Émissions CO2 pour la fabrication de l'infrastructure ERS
- Différences de tarification électricité
- ERS pourrait servir aux voitures
- Référence PL électrique  $\Rightarrow$  Gestion de flotte sur AB et CD