

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(work in progress, please do not quote)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

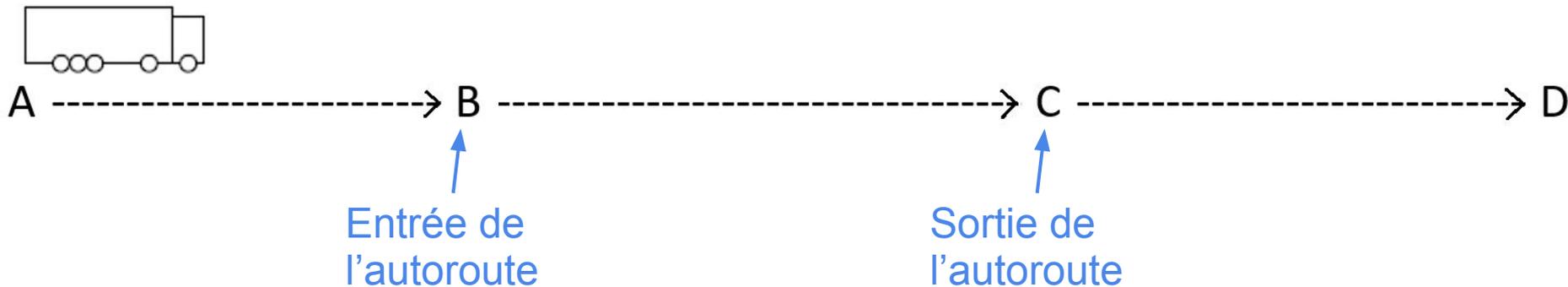
Schéma du service

Transport de la remorque par :

Tracteur diesel 1

Navette décarbonée

Tracteur diesel 2



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 θ) :

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

Coûts liés à l'amortissement du capital, durée d'utilisation, et distance parcourue

Coût fixe de plateforme

Coûts places de stationnement

Coûts installations de recharge des navettes

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

	Diesel	E. Rap	E. Lent	GNV	Hydro	ERS	ERS 2
Consommation (#/km)	0,300	1,300	1,300	0,270	0,089	1,300	1,300
Prix HT énergie (€/#)	0,440	0,117	0,117	0,810	9,300	0,117	0,117
Taxes énergie (€/#)	0,452	0,023	0,023	0,077	0,000	0,023	0,023
Prix TTC énergie (€/#)	0,892	0,140	0,140	0,887	9,300	0,140	0,140
Maintenance (€/km)	0,078	0,055	0,055	0,091	0,055	0,055	0,055
Prix achat véhicule (€)	85000	200000	200000	110500	255000	140000	125000
Subvention achat (€)	0	50000	50000	0	50000	50000	50000
Suramortissement (%)	0	40	40	40	40	40	40
Emissions usage (g/km)	837	57	57	130	250	57	57
Autres émissions (g/km)	66	103	103	26	56	51,5	25,75
Coût stations (M€)	0	0,42	0,08	1,03	6,3	0,42	0,42
Autres inv. (M€)	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 CO₂ à 150 eu/tonne

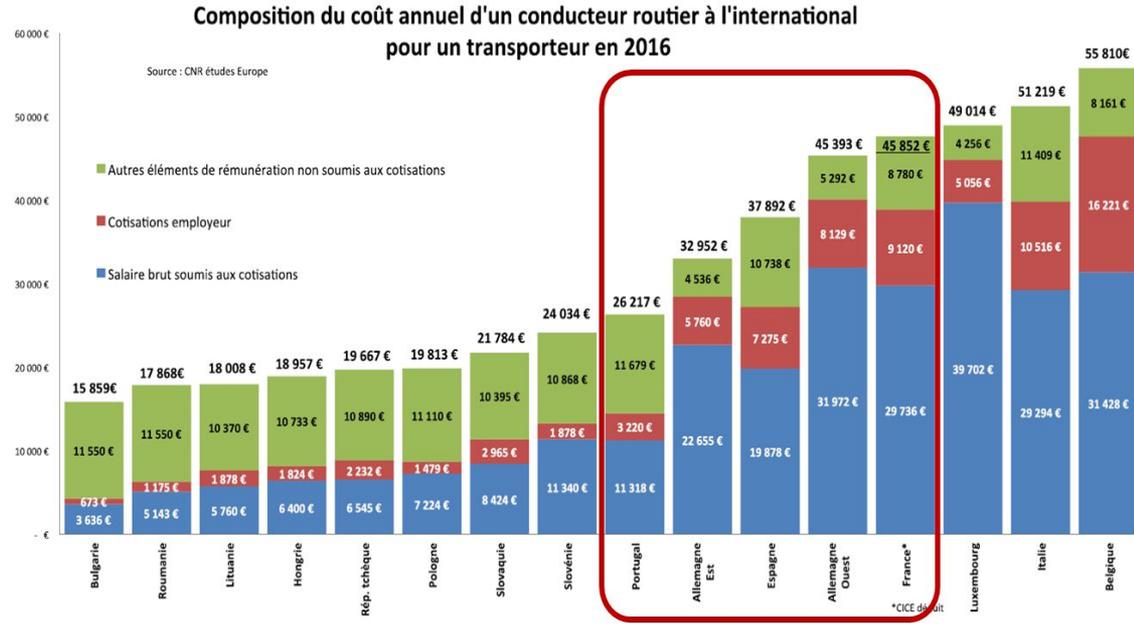
Calibration de la fonction de demande ($a = -130$; $b = 4,5$)

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)

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



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

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

	Diesel	E. Rap	E. Lent	GNV	Hydro	ERS	ERS 2
Prix service (€/km)	na	0,557	0,557	0,557	0,800	0,557	0,557
Q1 (veh/h)	0	350	350	350	0	350	350
Q0 (veh/h)	350	0	0	0	350	0	0
Flotte de navettes	0	2900	4100	2583	0	2700	2583
Places de parking pur	0	1940	2660	1750	0	1820	1750
Bornes (avec place associée)	0	400	1600	83	0	200	83
Profit joint (€/h)	7616	-16727	-22700	-22716	7616	-17400	-18665
CO2 émis (tonnes/h)	133	50	50	49	133	44	41
Social welfare (k€/h)	-136,1	-122,6	-130,6	-127,8	-136,1	-121,6	-122,2
Coût abattement (€/tonne)	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
Subvention (€/km)	na	0,291	0,142	0,203	-1,153	0,429	0,471
Prix service (€/km)	na	0,640	0,745	0,713	0,800	0,557	0,557
Q1 (veh/h)	0	230	80	125	0	350	350
Q0 (veh/h)	350	120	270	225	350	0	0
Flotte de navettes	0	1905	934	922	0	2700	2583
Places de parking pur	0	1274	606	625	0	1820	1750
Bornes (avec place associée)	0	263	364	30	0	200	83
Profit joint (€/h)	7616	18999	8977	10971	7616	30647	34134
CO2 émis (tonnes/h)	133	78	114	103	133	44	41
Social welfare (k€/h)	-136,1	-131,5	-135,5	-134,7	-136,1	-131,2	-132,7
Delta finances publiques (k€/h)	0	-38,9	-9,3	-15,6	0	-77,3	-82,7
Coût abattement (€/tonne)	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

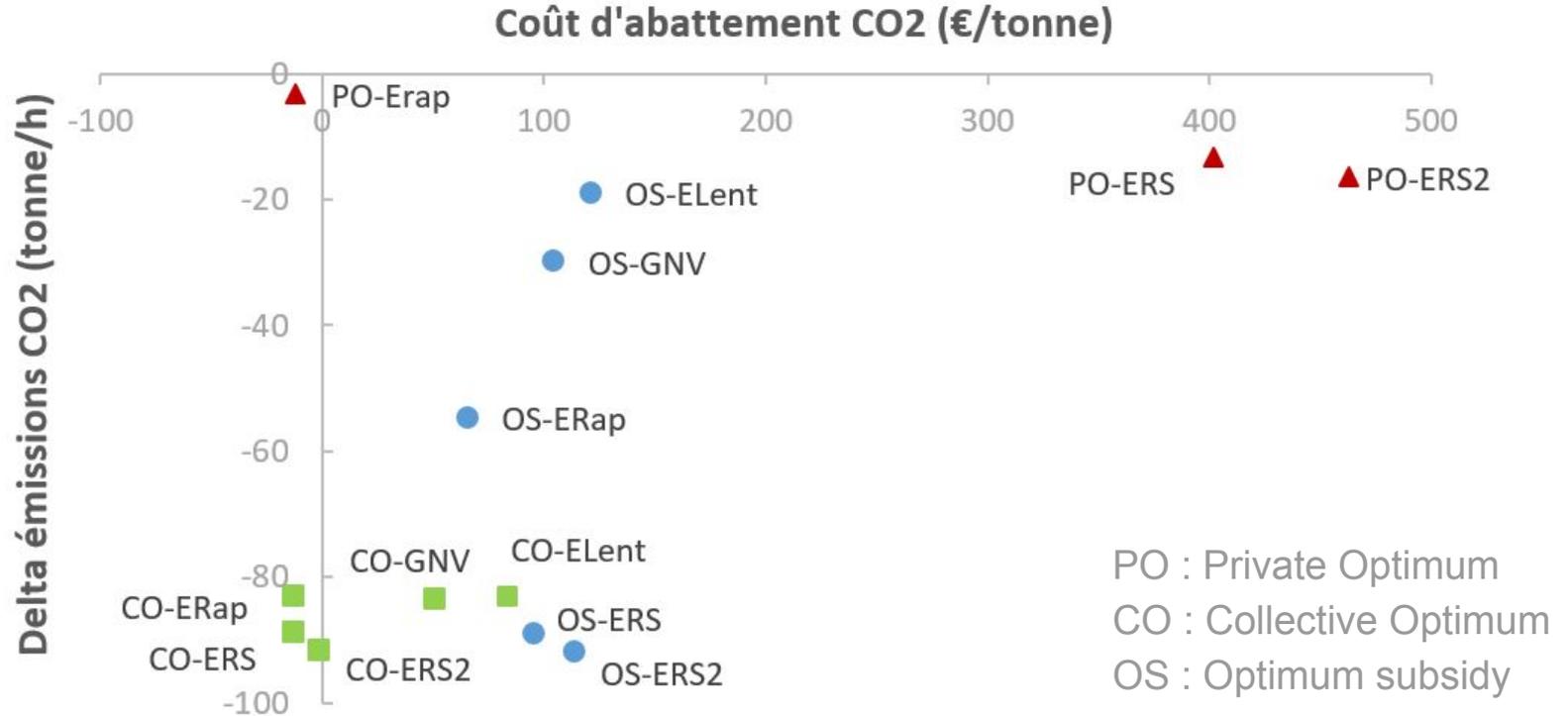
MAIS besoin d'une aide publique $> 0,4$ eu/km (fort transfert entre l'Etat et la SCA qui verrait son profit exploser)

- 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