

Comment réduire les émissions de CO₂ du transport routier de marchandises ?

Coûts d'abattement pour plusieurs scénarios en France

Martin Koning* (IFSTTAR-SPLOTT)

Cécilia Cruz (UBFC-ThéMA)

Christophe Rizet (IFSTTAR-DEST)

*Conférence ASFE – DG Trésor sur l'Évaluation des Politiques Publiques
Paris – Jeudi 14 décembre 2017*

Motivations :

- Transports : 27% des émissions de CO₂ en France (et part croissante depuis 25 ans)
- Transport de marchandises par poids-lourds (PL) : **25% de ces 27% (pour 5% des vkm sur les routes)**
- Politiques antérieures en faveur du fret ferroviaire et des voies d'eau relativement inopérantes
- Si la France veut respecter ses engagements en matière de réduction des GES, il serait probablement préférable **d'agir directement sur les technologies des PL**
- **Quelles sont les « meilleures » options ?**

Dans cet article :

- On calcule le **coût d'abattement d'une tonne de CO₂** résultant de 3 politiques (sur la période 2030-2050) :
 - **PL hybrides (PLH) alimentés en électricité sur les autoroutes** via des caténaires (subventionnés)
 - **PL roulant au Gaz Naturel Liquéfié (PLG)** via le déploiement de stations d'avitaillement (subventionnées)
 - **Hausse du PTRÀ à 60 tonnes (PL60)** et renforcement des capacités d'accueil du réseau (investissements)
- Analyse socio-économique : $CAC_{CO_2} = (\Delta SP + \Delta FP + \Delta X) / \Delta CO_2$
- De nombreux **tests de sensibilité**



Photo Source: Siemens Mobility



Marchés potentiels :

- Même si ces actions pourraient être menées au niveau européen, on cible le **fret domestique**
- Deux cas de figure : demande de PL fixe vs. élastique
- PLH et PLG : a priori, surtout intéressants pour le **transport interrégional** (ref = PL 40t longues distances)
- PL60 : a priori, surtout intéressants pour les **envois massifiés locaux** (ref = PL 40t régionaux remplis)

Tableau 2 – Marchés potentiels de fret en 2030

Fret en 2030	Ensemble (1)	Domestique (2) (en% de (1))	Interrégional (3) (en % de (1))	Massifié (4) (en % de (1))	PLG et PLH (5)=(1)x(3)	PL60 (6)=0,5x(1)x(4)
Routier (Mds tkm)	382,7	58,2%	39,7%	32,4%	151,9	62,0
Ferroviaire (Mds tkm)	47,2	59,0%	55,9%	45,9%	26,4	10,8
Fluvial (Mds tkm)	11,6	59,0%	55,9%	45,9%	6,5	2,7

Les transporteurs-chargeurs (1) :

- Le choix d'adopter une nouvelle technologie de PL (k) se prend en comparant les « **total costs of ownership** » :

$$TCO^k = -I_0^k + \frac{(I_0^k \times (1 - a)^T)}{(1 + r)^{T+1}} - \sum_{t=1}^T \frac{(CF_t^k + CV_t^k)}{(1 + r)^t}$$

- PLH : sur la base des TCO, on détermine le **sur-péage maximal d'accès aux caténaires** et l'Etat oblige les sociétés concessionnaires à ne pas dépasser 75% de ce montant (en échange d'une subvention)
- PL60 : on estime les surcoûts d'**immobilisation** (vitesse 10% moindre) et les **dépenses de stockage additionnelles** (envois moins fréquents pour remplir les PL60)

Les transporteurs-chargeurs (2) :

		PL40_LD	PLH	PLG	PL40_CD	PL60
Kilométrage	km/an	113000	113000	113000	90000	87480
Tonnage	tonnes/PL	18	18	18	25	40
Achat	euros	103000	128000	128000	103000	136990
Coûts fixes	euros/an	21373	21873	21873	23018	24255
Entretien	euros/km	0,110	0,088	0,165	0,115	0,173
Salaire chauffeur	euros/km	0,321	0,321	0,321	0,403	0,415
Consommation	énergie/km	0,300	1,500	0,250	0,300	0,405
Prix énergie HT	euros/énergie	1,070	0,078	1,100	1,070	1,070
Taxes énergie	euros/énergie	0,680	0,051	0,250	0,680	0,680
Prix énergie TTC	euros/énergie	1,750	0,128	1,350	1,750	1,750
Coût énergie TTC	euros/km	0,525	0,192	0,338	0,525	0,709
Péage autoroutes	euros/km	0,190	0,190	0,190	0,190	0,247
Part autoroutes	%	80	80	80	50	50
« Surcoûts »	euros/km	-	0,388	0,000	-	0,395
TCO	euros	-1646675	-1568198	-1567622	-1470768	-1865803
Coût unitaire	euros/km	1,457	1,388	1,387	1,634	2,133
Coût unitaire	euros/tkm	0,081	0,077	0,077	0,065	0,053
Delta euro/tkm	%	-	-4,77	-4,80	-	-18,43

Les transporteurs-chargeurs (3) :

- Avec les élasticités prix-demande du CGDD :

Fret routier en 2030	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
Depuis route (Mds tkm)	151.9	153.2	151.9	153.2	62.0	64.1
Depuis fer (Mds tkm)	-	1.9	-	1.9	-	3.0
Depuis fleuve (Mds tkm)	-	0.3	-	0.4	-	0.6
Total (Mds tkm)	151.9	155.4	151.9	155.5	62.0	67.6
Evolution vkm (%)	-	+2.3	-	+2.4	-37.5	-31.8

- Calculs de surplus standards ($\Delta p * q_0 + \frac{1}{2} * \Delta p * \Delta q$)
- Croissance du trafic de 1.3%/an et actualisation à 4.5%
- **Gains conséquents, surtout pour les PL60**

Gains de surplus	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
En 2030 (M euros)	586.2	593.0	590.5	597.5	746.9	780.7
VAN 2030-2050 (M euros)	8785.2	8887.8	8849.7	8953.9	11193.0	11700.8

Emissions de CO₂ :

- On considère les **émissions du « puits à la roue »**
- PL_gasole = 0.921kgCO₂/vkm ; trains = 3.614kgCO₂/vkm; barges = 33.156 kgCO₂/vkm

Gains de CO2	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
Emissions (kgCO2/vkm)	0.080		0.533		1.243	
Gains en 2030 (Mt)	5.68	5.67	3.28	3.21	0.36	0.23
Gains 2030-2050 (Mt)	136.20 (-73.1%)	135.79 (-72.8%)	78.60 (-42.2%)	76.83 (-41.2%)	8.55 (-15.6%)	5.57 (-10.2%)

- **Gains conséquents avec les PLH (-6 Mt/an)**
- Gains moindres pour les PL60 (en niveau et en %)
- **SNBC** : les émissions annuelles des transports (voyageurs et fret) devraient baisser de 12 Mt CO₂ en 2028

Finances publiques (1) :

- Investissements initiaux :
 - PLH : **L'Etat subventionne les sociétés autoroutières** (9500 km) afin que tout le réseau soit équipé de caténaires et que la VAN de leurs investissements soit nulle
 - PLG : **L'Etat prend à sa charge le déploiement de 100 stations d'avitaillement** (1 M euros/station) afin que les PL trouvent une source d'alimentation tous les 300 km
 - PL60 : **L'Etat renforce les ouvrages d'art et ajoute des dispositifs de sécurité sur les autoroutes et les nationales** (coûts d'investissement = 500000 euros/km)

Finances publiques (2) :

- Solde annuel :
 - Evolutions non-neutres sur les **recettes fiscales liées aux consommations énergétiques** (TICPE + taxe carbone)
 - Evolutions non-neutres sur les **dépenses d'entretien des routes publiques**

Coûts-recettes publiques	PLH	PLG	PL60
Taxes (euro/km)	0.076	0.063	0.275
Entretien routes (euro/km)	0.08	0.08	0.106
Taxe PL de référence (euro/vkm)		0.204	
Taxe trains (euro/vkm)		1.350	
Taxe voies d'eau (euro/vkm)		7.344	

- **Coût d'opportunité des fonds publics de 1.2**

Finances publiques (3) :

Solde des finances publiques	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
Investissement initial (M euros)	-10319	-9708	-120		-10772	
Solde en 2030 (M euros)	-866	-858	-1193	-1193	-45	-35
VAN 2030-2050 (M euros)	-25894	-25140	-21582	-21578	-11581	-11407

- Même s'ils nécessitent peu d'investissements initiaux, la fiscalité avantageuse des PLG implique de fortes pertes
- Avec le sur-péage régulé pour les PLH, fortes subventions publiques nécessaires
- La mise à niveau du réseau structurant pour les PL60 serait très onéreuse (quid pour les autres routes ?)

Externalités (1) :

- On considère les % des vkm conduits sur autoroutes vs. autres routes (populations exposées)
- **Polluants locaux** (Quinet, 2013) :
 - Les PLH n'en émettent pas en mode électrique (comme le fer)
 - Les PLG en émettent beaucoup moins (-80%)
 - Les PL60 en émettent plus (+35%)
- **Bruit** (Quinet, 2013) :
 - Pour les PLH, bruit caténaire = bruit moteurs (?)
 - Les PLG en émettent moins (-50%)
 - Les PL60 font autant de bruit que les PL40
- **Accidents** (Handbook européen, 2014) :
 - Les PL60 pourraient être plus dangereux car plus longs à doubler

Externalités (2) :

- **Congestion** (Handbook européen, 2014) :
 - On suppose que $C_{60t}=1.4*C_{40t}$ (car + longs et – rapides)

Coûts externes	PLH	PLG	PL60	PL40	Trains	Eau
Polluants locaux (euro/vkm)	-	0.011	0.085	0.056/0.063	0.022	1.120
Bruit (euro/vkm)	0.001	0.000	0.001	0.001/0.001	0.097	-
Accidents (euro/vkm)	0.006	0.006	0.008	0.006/0.007	-	-
Congestion (euro/vkm)	0.304	0.304	0.849	0.304/0.607	-	-

- **Gains externes conséquents** (surtout pour PLG, moindres pour les PL60 lorsque la demande est élastique)

Externalités	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
Solde en 2030 (M euros)	346	283	381	318	218	86
VAN 2030-2050 (M euros)	5184	4235	5703	4760	3267	1296

Coûts d'abattement :

Synthèse	PLH		PLG		PL60	
	Fixe	Var	Fixe	Var	Fixe	Var
VAN transporteurs (M euros)	8785	8888	8850	8954	11193	11701
VAN finances publiques (M euros)	-25894	-25140	-21582	-21578	-11581	-11407
VAN externalités (M euros)	5184	4235	5703	4760	3267	1296
CO ₂ économisé (Mt)	136.20	135.79	78.60	76.83	8.55	5.57
Coût d'abattement (euros/tonne)	87.6	88.5	89.4	102.3	-336.6	-285.2

- « **Bénéfices** » d'abattement pour les **PL60** (il suffit de changer les règles) mais des effets incertains
- **Coûts d'abattement acceptables pour les PLH et les PLG**, proches des dommages causés par une tonne marginale de CO₂ (98.8 euros en 2030, rapport Quinet)
- **Si la cible est le niveau de CO₂, on choisit les PLH**

Conclusions :

- Exercice à parfaire, néanmoins :
 - **Coût d'abattement des PL60 souvent négatif mais faibles économies de CO₂ en volume et des effets incertains**
 - **Coût d'abattement des PLH raisonnable et fortes économies de CO₂ en volume**
 - **Coût d'abattement des PLG raisonnable et réelles économies de CO₂ en volume**
 - **L'Etat supporte l'essentiel des coûts** (mais transferts du citoyen contribuable vers le citoyen consommateur)
- Des questions en suspens :
 - Affiner différents paramètres (PL60 notamment)
 - Impacts sur le secteur ferroviaire et l'emploi (PL60 notamment)
 - Relations avec les sociétés concessionnaires (PLH)

Merci d'avance pour vos commentaires :

martin.koning@ifsttar.fr

(ce travail complète un contrat de recherche financé par la DGITM)

		PLD	PLH	PLG	PL40	PL60
Kilométrage	km/an	113000	113000	113000	90000	87480
Tonnage	tonnes/PL	18	18	18	25	40
Possession	ans	10	10	10	10	10
Actualisation	%	8	8	8	8	8
Dépréciation	%	4	4	4	4	4
Achat	euros	103000	128000	128000	103000	136990
Valeur résiduelle	euros	29369	36497	36497	29369	39061
Assur. véhicule	euros/an	2060	2560	2560	2060	2739,8
Assur. marchandises	euros/an	410	410	410	497	796
Taxe essieu	euros/an	516	516	516	516	774
Charges admin.	euros/an	18387	18387	18387	19945	19945
Entretien	euros/km	0,110	0,088	0,165	0,115	0,173
Salaire chauffeur	euros/heure	22,4	22,4	22,4	22,4	22,4
Durée travail	heures/jour	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Jours activités	jours/an	216	216	216	216	216
Vitesse moyenne	km/h	70	70	70	60	54
Salaire chauffeur	euros/km	0,321	0,321	0,321	0,403	0,415
Conso	énergie/km	0,300	1,500	0,250	0,300	0,405
Prix énergie HTT	euros/énergie	1,070	0,078	1,100	1,070	1,070
Taxes énergie	euros/énergie	0,680	0,051	0,250	0,680	0,680
Prix énergie TTC	euros/énergie	1,750	0,128	1,350	1,750	1,750
Coût énergie TTC	euros/km	0,525	0,192	0,338	0,525	0,709
Coûts taxes énergie	euros/km	0,204	0,076	0,063	0,204	0,275
Péage AC	euros/km	0,190	0,190	0,190	0,190	0,247
Part utilisation AC	%	0,800	0,800	0,800	0,500	0,500
Sur-péage	euros/km	0,000	0,388	0,000	0,000	0,000
Immo./stockage	euros/km	0,777	0,777	0,777	0,919	1,314
TCO	euros	-1646675	-1568198	-1567622	-1470768	-1865803
Coût unitaire	euros/km	1,457	1,388	1,387	1,634	2,133
Coût unitaire	euros/tkm	0,081	0,077	0,077	0,065	0,053
Delta euro/tkm	%	-	-4,77	-4,80	-	-18,43

Sur-péage et subvention (PLH) :

- Le TCO des PLH dépend de la longueur du réseau autoroutier équipé de caténares ainsi que du sur-péage d'accès (pour couvrir les dépenses d'électricité et l'entretien des infrastructures)
- Si tout le réseau est doté de caténares, on peut déterminer le sur-péage maximal ($S_m=0.518$ eu/km), i.e. tel que $TCO_PLH=TCO_PL40$
- L'Etat souhaite que les transporteurs optent pour les PLH et contraint donc les sociétés à pratiquer $S=0.75*S_m=0.388$ eu/km, en échange d'une subvention afin que leur VAN soit (au -) nulle :

$$VAN_j = -I_0^{AE} \times L_j + \frac{(I_0^{AE} \times L_j \times (1-a)^{20})}{(1+r)^{21}} + \sum_{t=1}^{20} \frac{[(S_{t,C}^H - En_{t,C}^H) \times VKM_{t,j}^H - L_j \times E_t^{AE}]}{(1+r)^t}$$

- $I_0=2M/km$, $L=9500km$, $S=0.388$ et $En=0.192$ eu/km, $E=0.1$ M/km/an :
 - Subvention = - VAN = 8599 M euros si VKM_PLH fixe
 - Subvention = - VAN = 8090 M euros si VKM_PLH variable
- Possibilité de refaire ces calculs pour les différents réseaux

Immobilisation et stockage (PL60) :

- Les PL60 ont au moins 2 effets sur le **coût logistique total** :
 - Immobilisation de la marchandise en route (car vitesse 10% plus faible)
 - Hausse du coût de stockage/entreposage (car le tonnage transporté dans un PL augmente de 60%, 40t vs. 25t, il faut plus de temps pour remplir le PL)
- Pour le surcoût d'immobilisation, on utilise une valeur du temps de 0.6 euros/heure/tonne : **$\Delta \text{Immob.} = + 0.194 \text{ euros/vkm}$**
- Pour estimer les surcoûts de stockage/entreposage :
 - On utilise les ratios du benchmark de l'ASLOG : **$C_{\text{Stock}} = 0.48 * C_{\text{Transport}}$**
 - On calcule donc le coût de stockage initial ($= 0.48 * C_{\text{Transport}}_{\text{PL40}}$)
 - On majore ce coût de stockage initial des PL40 de 30% ($= 0.5 * 60\%$)
- On trouve donc **$\Delta \text{Stock.} = + 0.201 \text{ euros/vkm} = +17500 \text{ euros/an}$**
- Les ratios de l'ASLOG comprennent-ils les coûts d'immobilisation durant le stockage ?

Tableau 14 – Coûts d'abattement / économies de CO₂ en 2030

	PLH	PLG	PL60
Benchmark	88,5/5,7	102,3/3,2	-285,2/0,2
Marchés fret potentiels : + 20%	46,7/6,8	102,1/3,8	-607,3/0,3
Marchés fret potentiels : - 20%	151,3/4,5	102,7/2,6	198,1/0,2
Prix HT du diesel : +20%	36,3/5,7	36,5/3,2	-359,3/0,2
Prix HT du diesel: -20%	140,5/5,6	164,9/3,2	-210,7/0,2
Elasticité prix-demande : +20%	88,8/5,7	105,0/3,2	-267,5/0,2
Elasticité prix-demande : -20%	88,2/5,7	99,7/3,2	-299,4/0,3
Coûts matériels et infrastructures : +20%	144,4/5,7	108,1/3,2	79,2/0,2
Coûts matériels et infrastructures : -20%	32,6/5,7	96,6/3,2	-650,5/0,2
Consommation PL : +20%	22,5/6,8	99,7/3,8	-309,2/0,3
Consommation PL : -20%	188,4/4,5	105,5/2,6	-248,0/0,2
Chargement véhicules : -10%	64,6/5,4	104,8/2,7	-498,9/0,3
Chargement véhicules : -20%	40,4/5,1	107,2/2,1	-720,8/0,3
Péage caténares = 0.9*Péage maximal	56,7/5,7	102,3/3,2	-285,2/0,2
Péage caténares = 0.5*Péage maximal	144,9/5,6	102,3/3,2	-285,2/0,2
Congestion et accidents PL60 : +20%	88,5/5,7	102,3/3,2	494,2/0,2
Congestion et accidents PL60 : -20%	88,5/5,7	102,3/3,2	-1064,6/0,2
Prix HT du gaz naturel : +20%	88,5/5,7	155,8/3,2	-285,2/0,2
Prix HT du gaz naturel : -20%	88,5/5,7	46,8/3,2	-285,2/0,2

Source : calculs des auteurs