

« Decarbonizing road freight transport: An economic analysis of innovative shuttles on French highways »

Séminaire SPLOTT

Lundi

9 mai 2022

Pourquoi décarboner le secteur des transports ?

- En France, le secteur des transports représente 31% des émissions de carbone, et le transport routier de marchandises (TRM) contribue pour un quart à ces émissions.
- 94 % des émissions du secteur des transports proviennent de la circulation routière et 25% proviennent des autoroutes
- En France, Il existe 1.100.000 km de route et 12000 km d'autoroute dont 9000km qui sont concédés à des opérateurs privés.
- La part modale de la route n'a fait qu'augmenter ces dernières années et restera prépondérante dans les années à venir.
- Selon le rapport du CGEDD (2022), les projections montrent que si aucune mesure n'est prise, les émissions du transport de fret devraient presque doubler d'ici à 2060, passant de 94Mt à 148 Mt.
- La décarbonation de l'économie passe aussi par la décarbonation de la route, et donc de l'autoroute

Pourquoi Vinci ?

- Vinci est gestionnaire de 4443 km du réseau autoroutier (Soit environ 50% du réseau concédé)
- La transformation environnementale est au cœur des préoccupations de Vinci
- Vinci représente 15 millions de tonnes de CO₂ (VL+PL) chaque année
- Le trafic PL représente 15% des trafics de Vinci et 45 % de ses émissions.
- Dans le cadre de la Responsabilité Sociale des Entreprises, Vinci prend en compte les émissions scope 3 aval (émissions des clients)

Technologies de décarbonation envisagées

En ce qui concerne les véhicules Poids Lourds (PL), différentes technologies de motorisation sont envisagées:

- L'électrique rapide
- L'électrique lent
- Le Bio-GNV
- le biodiesel (non étudié dans notre cas),
- L'Hydrogène (PAC H₂)
- L'Electrique caténaire

Électrique <i>Charge rapide</i>	▶ Véhicules à batterie électrique avec recharge rapide aux deux extrémités permettant de réaliser 2 rotations/jour par véhicule (800 000 km atteints en 2 ans). ▶ Rotation maximale des véhicules qui optimise l'investissement mais laisse peu de marge en cas d'attente ou d'aléa.	▪ Autonomie à plein de 800 km ▪ Méga-chargeurs (45 min pour 400 km) ▪ Recharge systématique après un trajet simple
Électrique <i>Charge lente</i>	▪ Véhicules à batterie électrique avec recharge « lente » après une rotation complète. ▪ Ce modèle ne permet de réaliser qu'une seule rotation par jour, ce qui laisse plus de marge pour gérer les attentes des rdv transporteurs en plateforme et permet d'envisager un meilleur taux de remplissage du service.	▪ Autonomie de 800 km ▪ Chargeurs classiques (8h pour 800 km) ▪ Recharge systématique après une rotation

Hydrogène	▶ Véhicules avec une motorisation pile à combustible hydrogène avec recharge rapide aux deux extrémités permettant de réaliser 2 rotations/jour par véhicule (800 000 km atteints en 2 ans). ▶ Rotation maximale des véhicules qui optimise l'investissement mais laisse moins de marge en cas d'attente ou d'aléa.	▪ Autonomie de 800 km ▪ Station hydrogène (9min pour 800 km) ▪ Recharge systématique après un trajet simple
Bio-GNV	▶ Véhicules avec une motorisation bio-GNV avec station à remplissage rapide aux deux extrémités permettant de réaliser 2 rotations/jour par véhicule (800 000 km atteints en 2 ans). ▶ Rotation maximale des véhicules qui optimise l'investissement mais laisse moins de marge en cas d'attente ou d'aléa.	▪ Autonomie de 600 km ▪ Station hydrogène (10min pour 600 km) ▪ Recharge systématique après un trajet simple

Quels sont les enjeux liés à ces technologies ?

- Permettre au TRM de réduire de 30% leurs émissions par rapport à 2020 (rapport GT1)
- Pour réduire considérablement l'empreinte carbone du fret
- Pour contenir l'ampleur du réchauffement climatique à -1.5 %
- Pour tendre vers l'objectif de réduction de 55% des émissions (par rapport à 1990) en 2030 dans l'Union Européenne.
- L'ERS (caténaire) permet de réduire également certaines nuisances (bruit, congestion, dégradation de la voirie, artificialisation des sols ou encore l'insécurité routière)
- Le biogaz et le biodiesel présentent des risques majeurs en termes de disponibilité car
 - utilisé pour satisfaire plusieurs besoins (chauffage, production électrique et industrie pour le biogaz, aviation pour les biocarburants)
 - difficile d'estimer leur gisement,
- Le biométhane qui est un biogaz a un pouvoir de réchauffement global 84 fois supérieur à celui du CO2
- Dans le souci de remplacer les combustibles fossiles par des alternatives bas carbone

Projet «Decarbonation as a service (Daas)» de Vinci

Dans ce contexte, à travers le projet « Daas», Vinci souhaite dépasser sa simple fonction de gestionnaire d'infrastructures pour proposer des services de navettes pour le TRM.

Ainsi, il s'agit de:

- Etudier, déterminer, formaliser et estimer le péage d'équilibre du point de vue de Vinci, et cela pour différentes technologies.
- Refaire le même calcul du point de vue de la collectivité
- Faire la jonction entre les deux pour déduire des implications de politiques publiques

Modèle de décarbonation: navette électrique

Formule “navette”: changement de tracteur en début et en fin de parcours sur l'autoroute électrique.

Le modèle de décarbonation étudié peut être schématisé comme suit:

Origine----->>>>> Autoroute Electrique>>>>> ----- Destination

Hypothèses:

- Tracteur qui récupère une remorque
- Pas de massification (1 PL= 1 navette)
- Une écotaxe est appliquée sur les PL qui émettent au delà d'un certain seuil d'émission.
- Les transporteurs utilisant le service de la navette bénéficient d'une aide à la pince
- Les transporteurs ont le choix entre utiliser la navette et utiliser l'autoroute normale
- Nous considérons une fonction de demande linéaire pour la navette

Avantages de la formule navette pour les clients:

- Le changement de chauffeur sur le corridor permet d'éviter les pauses réglementaires et de faire avancer les marchandises en continu (particulièrement la nuit pour les PME françaises qui travaillent en 2x8).
- En termes de responsabilité contractuelle de la marchandise, la bascule juridique se fait lors de la prise en charge de la remorque (au sein du contrat qui liera le client et l'exploitant du service)

Coûts supportés par le transporteurs

Le transporteur supporte principalement deux types de coûts:

- **Coûts kilométriques**

- coût de l'énergie
- usure du véhicule
- droit d'accès à l'infrastructure
- entretiens, assurance et taxes sur le véhicule

- **Coûts liés au temps**

- coût de possession amorti du véhicule
- coûts des ressources humaines (chauffeur, etc)

Deux options envisagées:

Option0: les transporteurs utilisent l'autoroute normale uniquement

Option1: une partie des transporteurs utilisent le service de navette et une autre partie utilisent l'autoroute normale

A----->B---Autoroute---C->-----> D

De ces options, découlent les coûts généralisés suivants:

Coûts généralisés (CG)

CG_0 = (coûts kilométriques_AD + coûts du temps de la marchandise_AD + coûts en temps du chauffeur côté transporteur_AD + montant péage_BC + écotaxe_(AB+CD))

CG_1 = coûts kilométriques_(AB+CD) + coûts du temps de la marchandise_(AD+waiting time + chargement/déchargement) + coût d'utilisation de la navette_BC + coûts en temps du chauffeur côté transporteur_(AB+CD) + écotaxe_(AB+CD) – montant aide à la pince

$$CG_1 - CG_0 = [\alpha^m q^m \cdot (t_w + 2t_R) - d_{BC}(c + p_0 - p_1^\theta) + (\alpha_1^{ch} - \alpha_0^{ch})(t_{AB} + t_{CD}) - \alpha_0^{ch} t_{BC} - 2\tau]$$

Coûts d'exploitation de la navette électrique

- Coût fixe noté F qui décrit les coûts liés aux ruptures de charge (manutention, waiting time,..)
- Coûts variables proportionnels à la distance noté $\mathbf{v}$. d_{BC} :
 - ✓ Dépenses kilométriques de maintenance du véhicule (la navette)
 - ✓ Consommation kilométrique * prix énergie
 - ✓ Salaire horaire chauffeur de la navette* temps nécessaire pour 1km.

Profit de Vinci

- Q_1 = Demande des transporteurs qui font recours à la navette. Cette demande dépend de la différence de coûts généralisés entre les deux options.

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

$$Q_1 = a - b [\alpha^m q^m \cdot (t_w + 2t_R) - d_{BC}(c + p_0 - p_1^\theta) + (\alpha_1^{ch} - \alpha_0^{ch})(t_{AB} + t_{CD}) - \alpha_0^{ch} t_{BC} - 2\tau]$$

- Q_0 = Demande des transporteurs qui utilisent l'autoroute normale (avec $Q_0 = 100\%$ dans l'option0).
- **Profit option0:** Recette de péage issue de la demande Q_0 - montants de dégradations/usures des routes – Coût d'investissement (autoroute normale)
- **Profit option1:** Somme des recettes issues de chaque demande – coûts de dégradations/usures des routes- coûts d'exploitation de la navette –coûts d'investissements (autoroute normale+ autoroute avec navette)

Péage optimal (pour Vinci)



- L'expression du péage optimal est déterminé

$$p_1^\theta = \frac{1}{2b \cdot d_{BC} (1 - \tau_1^\theta)} \left[(1 - \tau_1^\theta) \cdot X + b[(F + v \cdot d_{BC}) + p_0 \cdot d_{BC}(1 - \tau_0)] - \frac{1}{d_{BC}} \frac{\partial(I^1 + I^0)}{\partial p_1} \right]$$

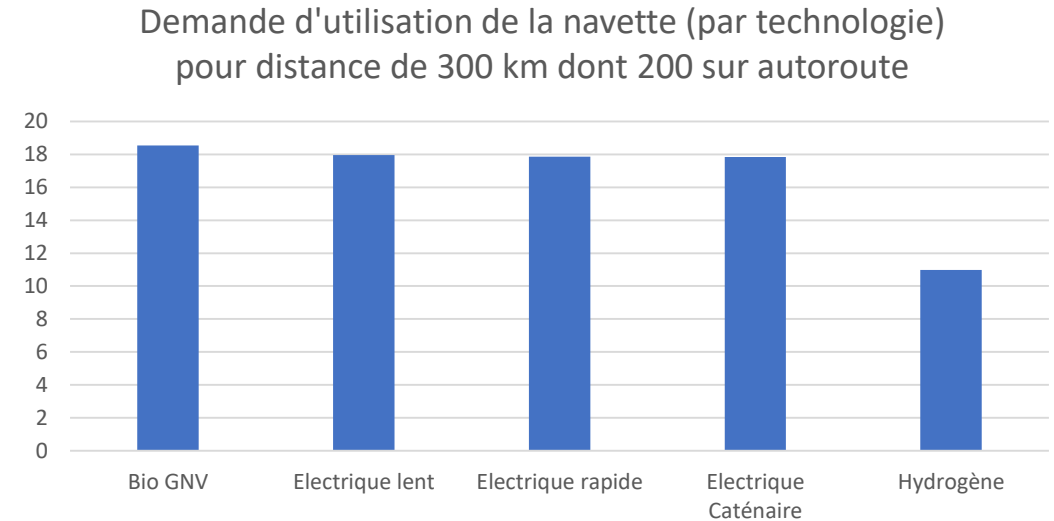
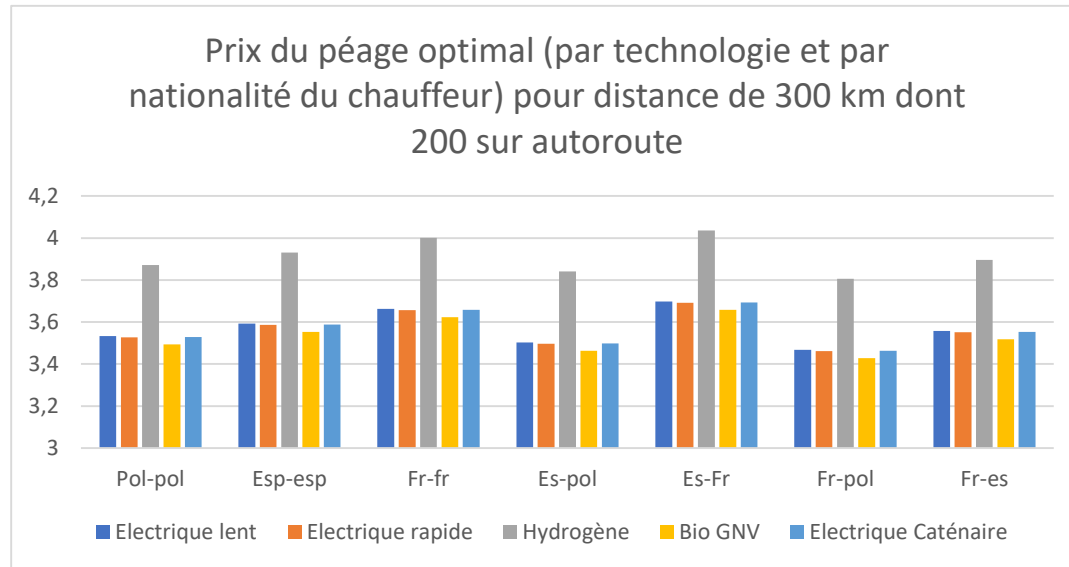
- $X = \{ a - b[\alpha^m q^m \cdot (t_w + 2t_R) - d_{BC}(c + p_0) + (\alpha_1^{ch} - \alpha_0^{ch})(t_{AB} + t_{CD}) - \alpha_0^{ch} t_{BC} - 2\tau] \}$

avec

- d_{BC} = distance entre l'entrée et la sortie de l'autoroute électrique
- $(F + v \cdot d_{BC})$ = coût d'exploitation de la navette électrique
- $(1 - \tau_0)$ = part du péage qui revient à Vinci lorsque le transporteur utilisent l'autoroute normale
- $(1 - \tau_1^\theta)$ = part du péage qui revient à Vinci lorsque le transporteur utilisent la navette électrique qui fonctionne avec la technologie θ .
- α^m = coût en temps de la marchandise côté Vinci (valeur 1t pour 1h)
- α^{ch} = coût en temps du chauffeur côté transporteur.

- **Les expressions de prix d'équilibre de la navette augmentent avec le prix du péage p_0** (si celui ci peut varier). Autrement dit, le prix d'utilisation de la navette augmente lorsque le coût d'utilisation de l'autre option (ne pas utiliser la navette mais plutôt l'autoroute) augmente.
- Le waiting time, ainsi que le temps de chargement et de déchargement affectent négativement le prix d'équilibre. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les transporteurs sont plus enclin à payer plus pour que leurs marchandises arrivent plus vite.
- D'autre part, lorsque le coût en temps du chauffeur (i.e. côté transporteur α^{ch} augmente, le prix d'utilisation de la navette augmente.
- De même, une augmentation des coûts d'exploitation de la navette (la partie variable $v \cdot d_{BC}$) augmenterait le prix d'utilisation de la navette.

Prix du péage optimal et demande de navette (1)



- Les montants de péage les plus élevés correspondent au cas où on a des chauffeurs Français qui conduisent dans l'option0 (cas Fr-Fr et Es-Fr). En revanche, les montants les plus faibles observés correspondent au cas où on a des chauffeurs polonais dans l'option0 (cas Fr-Pol et Es-Pol).
- L'hydrogène (PAC H2) est la technologie pour laquelle le péage optimal de Vinci est le plus élevé. Par contre, le péage optimal est à son plus bas niveau avec le Bio GNV.
- En ce qui concerne la demande de navette, elle est élevée avec le BIO-GNV et faible avec l'hydrogène.

Prix du péage optimal et demande de navette (2)

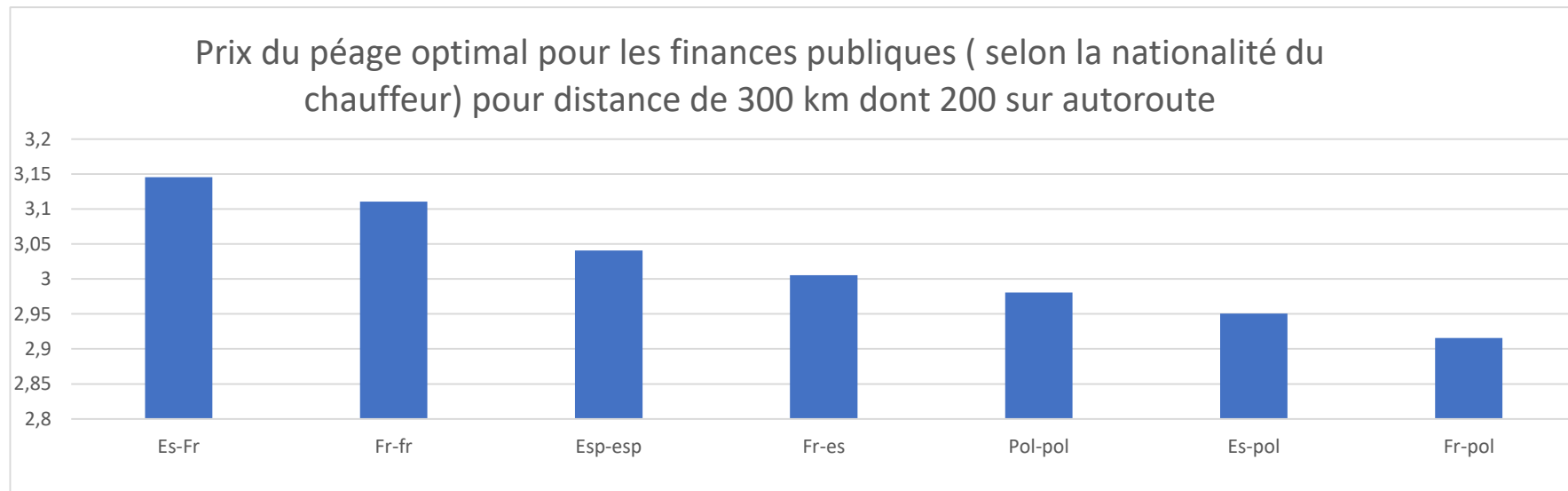
- Le péage d'équilibre lorsqu'on utilise la navette est supérieur au péage sur autoroute normale (environ 1,5 eur/km).

Dans l'option "navette", selon l'expression du péage d'équilibre pour Vinci,

- lorsque la distance parcourue sur autoroute est longue, le prix d'équilibre tend à baisser, la demande des utilisateurs peut augmenter ou baisser (selon les coûts d'exploitation de la technologie alimentant la navette).
- Par exemple, pour la technologie "électrique rapide" lorsqu'on a des conducteurs français sur une distance de 300 km dont 200 sur autoroute, le péage optimal est de 3,65euros/ km alors qu'il passe à 3,05 euros/km lorsqu'on parcourt une distance de 600km dont 500sur autoroute.

Finances publiques

Finance Publique = Recettes de l'Etat issues des péages (autoroute normale + autoroute électrique) + montants perçus des écotaxes – dépenses liées aux aides à la pince



- Le prix du péage qui maximise les FP est toujours inférieur à celui qui maximise le profit de Vinci
- Le prix du péage qui maximise les FP est plus élevé lorsqu'il s'agit de chauffeurs Français qui conduisent dans l'option 0.

Objectifs à court terme

- Estimer les émissions de GES pour chacune des technologies
- Déterminer le prix qui maximise le bien être social défini ci dessous

$$\text{Social welfare (SW)}_{\text{option1}} = \textit{Profit de Vinci} - Q_1 \cdot CG_{\text{option1}} - Q_0 \cdot CG_{\text{option0}} + FP - GES$$

- Calibrer davantage (creuser plus sur les valeurs de certains paramètres)
- Faire un peu plus de statique comparative
- Calculer le profit/recette, et pas uniquement des demandes

Objectifs à moyen/long terme

A moyen/long terme, il s'agira de voir comment

- dépasser le cadre très simple d'une O-D
- prendre en compte des raffinements sur des effets de réseaux
- prendre en compte les contraintes horaires des chauffeurs
- passer d'un exemple empirique calibré à un modèle de trafic ou une enquête de préférence déclarée.