

18TH MADRID 2009

INTERNATIONAL     
TRANSPORT RESEARCH SYMPOSIUM

Document de référence n° 2009-28

Novembre 2009

Les perspectives du transport interurbain de personnes Rapprocher les citoyens

SESSION 5 : UNE MOBILITÉ INTERURBAINE DURABLE

Aspects environnementaux du transport interurbain de voyageurs

par

Per KAGESON

Nature Associates
Stockholm

Suède

*Les points de vue exposés dans ce rapport sont ceux de son auteur et
ne représentent pas nécessairement ceux de Nature Associates,
de l'OCDE ou du Forum International des Transports.*

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	3
1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME.....	4
2. CONCURRENCE INTERMODALE.....	5
3. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX.....	6
4. GAZ D'ÉCHAPPEMENT.....	7
5. BRUIT.....	8
6. AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET PAYSAGES.....	9
7. CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	10
8. TRAINS ÉLECTRIQUES.....	10
9. AVIONS.....	13
10. VOITURES PARTICULIÈRES.....	14
11. AUTOCARS DE LIGNE.....	15
12. ÉMISSIONS INDIRECTES INDUITES PAR LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ.....	16
13. EFFETS MARGINAUX DE L'AUGMENTATION DE LA DEMANDE DE CARBURANTS FOSSILES.....	18
14. COEFFICIENTS FUTURS D'ÉMISSION.....	19
15. TAUX DE REMPLISSAGE.....	19
16. IMPACT DU TRANSFERT MODAL SUR LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE.....	21
17. ÉVALUATION DU CO ₂	24
18. ANALYSE DE SENSIBILITÉ.....	24
19. LIBÉRATION DE CAPACITÉS POUR LES TRANSPORTS DE MARCHANDISES – CAS DE LA SUÈDE.....	25
20. CONCLUSIONS.....	27
NOTES.....	28
BIBLIOGRAPHIE.....	29

RÉSUMÉ

Beaucoup d'États de par le monde investissent dans la grande vitesse ferroviaire. Certains d'entre eux le font, parce qu'ils veulent y voir un moyen important de lutte contre le changement climatique. Le transport interurbain à moyenne distance est particulièrement intéressant dans le contexte environnemental, parce qu'il constitue le seul segment du marché des transports sur lequel l'avion, le train, l'autocar et la voiture se disputent normalement des parts de marché.

Le présent rapport calcule l'effet que la construction d'une ligne à grande vitesse reliant entre elles deux grandes villes éloignées de 500 kilomètres l'une de l'autre peut avoir sur les émissions. Il pose en hypothèse que les émissions produites par les véhicules et avions neufs en 2025 peuvent être considérées comme étant représentatives des émissions produites pendant une période d'amortissement des investissements de 50 ans. Les émissions générées par la production marginale de l'électricité consommée par les trains et les véhicules électriques sont estimées égales à 530 grammes en moyenne par kWh sur l'ensemble de la période. Les véhicules routiers sont censés consommer en moyenne 80 pour cent d'énergie d'origine fossile et 20 pour cent d'énergie renouvelable (dont l'efficacité en carbone se chiffre à 65 pour cent).

Le trafic qui parcourra la nouvelle ligne après quelques années se composera de déplacements enlevés à hauteur de 20 pour cent à l'avion, de 20 pour cent à la voiture, de 5 pour cent à l'autocar de ligne et de 30 pour cent au train classique, les 25 pour cent restants étant du trafic nouveau induit. L'investissement entraînerait dans une telle hypothèse une réduction nette des émissions de CO₂ d'environ 9 000 tonnes par million de déplacements. Si le nombre annuel de déplacements s'élève à 10 millions, la réduction totale est donc de 90 000 tonnes.

Au prix de 40 € par tonne de CO₂, le gain socioéconomique tiré de la réduction s'élèverait à 3.6 millions € ce qui est très peu dans le contexte de la grande vitesse ferroviaire. L'analyse de sensibilité révèle que d'autres hypothèses ne changent pas grand chose au résultat. Il faut par ailleurs sans doute tenir compte aussi de l'impact de la construction de la nouvelle ligne sur le changement climatique. Les émissions de CO₂ générées par la construction d'une ligne d'une telle longueur pourraient atteindre plusieurs millions de tonnes.

Il ne se justifie pas d'interdire, pour des raisons environnementales, d'investir dans la grande vitesse ferroviaire, si la réduction des émissions de carbone produites par le trafic contrebalance les émissions produites pendant la construction, mais il est manifestement fallacieux de vouloir faire passer la grande vitesse ferroviaire pour une des solutions au problème du changement climatique. Il ne doit s'envisager d'investir dans des infrastructures génératrices de transfert modal, que si le trafic est suffisant pour couvrir leur coût. Les principaux avantages de la grande vitesse ferroviaire procèdent des gains de temps, du renforcement des capacités et du trafic induit et non de la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Le transport interurbain de voyageurs progresse rapidement pour répondre à la demande de mobilité émanant des particuliers et des entreprises. La conversion aux modes de transport rapides permet de parcourir annuellement de plus longues distances en un temps limité. L'avion et le train à grande vitesse sont les modes les plus rapides. Quoique la grande vitesse ait des atteintes à l'environnement pour prix, beaucoup de défenseurs de l'environnement affirment, de même que les opérateurs et les organisations représentatives du secteur ferroviaire, que les trains à grande vitesse n'affectent guère l'environnement et devraient être autorisés à devenir un moyen important de lutte contre le changement climatique.

De Rus et Nash (2007) estiment en revanche que les décisions d'investir dans la grande vitesse ferroviaire ne se fondent pas toujours sur une analyse économique solide et qu'en dehors des gains de temps, plusieurs arguments (considérations stratégiques, impact sur l'environnement, développement régional, etc.) ont souvent été avancés sans être suffisamment étayés.

Le transport interurbain sur des distances de 400 à 800 kilomètres est particulièrement intéressant dans le contexte environnemental parce qu'il constitue le seul segment du marché des transports sur lequel l'avion, le train, l'autocar de ligne et la voiture se disputent des parts de marché. Au nombre des facteurs qui dictent le choix modal se rangent le prix, la durée du déplacement, la fréquence, le confort et la sécurité personnelle. Les considérations d'ordre environnemental semblent également jouer un rôle, mais rares sont ceux qui sont prêts à faire des grands sacrifices en termes de coût pour contribuer à améliorer l'environnement.

Le présent rapport tente de déterminer si l'incidence des différents modes de transport sur l'environnement est suffisamment inégale pour justifier l'investissements de fonds publics dans des moyens de transfert modal. Les investissements en infrastructures nouvelles devant habituellement s'amortir sur 40 à 60 ans, le présent rapport se situera dans une perspective à long terme. Il serait manifestement erroné de limiter l'analyse à l'inégalité actuelle de l'impact des voitures, des autocars, des trains et des avions sur l'environnement.

Le rapport distingue les trains rapides des trains à grande vitesse. La vitesse maximale des premiers va de 150 à 200 km/h, tandis que celle des seconds excède 250 km/h, mais les vitesses moyennes des uns et des autres peuvent, pour cause d'état de la voie, être plus faibles.

2. CONCURRENCE INTERMODALE

L'auteur part du point de vue que peu de personnes trouvent acceptable de circuler entre des villes distantes de 400 à 800 kilomètres à moins de 90 à 100 km/h de moyenne, si les infrastructures existantes permettent d'atteindre cette vitesse ou de la dépasser. Les avantages environnementaux que la pratique de vitesses moyennes inférieures à 100 km/h peut générer ne sont donc pas pris en compte dans le présent rapport.

La disposition à payer pour la grande vitesse varie d'un individu à l'autre et dépend étroitement des revenus (ou du paiement du prix par un tiers). Le fait que certains voyageurs préfèrent les trains interurbains lents aux trains rapides ou aux trains à grande vitesse en porte témoignage. Il s'en suit qu'un investissement en infrastructures ferroviaires destinées aux trains à grande vitesse n'aura qu'un effet négligeable, si tant est qu'il en ait un, sur les voyageurs qui préfèrent actuellement les trains locaux (omnibus) aux trains rapides existants. L'effet sera vraisemblablement également faible, sans être toutefois négligeable, sur ceux qui préfèrent se déplacer en voiture parce qu'ils trouvent le déplacement en voiture moins coûteux (plusieurs occupants dans une même voiture) ou ont besoin d'une voiture quand ils arrivent à leur destination.

Le Tableau 1 indique le temps nécessaire pour aller d'un centre-ville à un autre centre-ville en empruntant différents modes de transport. Il est posé en hypothèse qu'un passager aérien passe en moyenne 70 minutes au total au sol pour rejoindre un aéroport et le quitter et doit s'enregistrer 30 minutes plus tôt qu'un voyageur qui se déplace en train. Les passagers qui doivent faire enregistrer des bagages pourraient encore avoir besoin de 10 minutes de plus. Les avions perdent en outre 10 minutes en temps d'attente et de circulation sur le tarmac, tandis les voyageurs qui se déplacent en autocar ou en voiture doivent consacrer 30 minutes de leur temps à un repas rapide si la distance à parcourir est de 600 à 800 kilomètres.

Il ressort clairement du Tableau que les trains classiques peuvent concurrencer l'avion sur des distances qui ne dépassent pas 400 kilomètres. A partir de 600 kilomètres, il faut un train à grande vitesse pour battre l'avion. Le fait que certains optent malgré tout pour l'avion peut s'expliquer par différents facteurs, dont la fréquence des liaisons, le prix et les préférences personnelles. L'avion l'emporte à partir de 800 kilomètres.

Tableau 1. **Durée du trajet de centre-ville à centre-ville accompli par différents modes de transport, compte tenu des temps d'accès, d'attente et (pour les voitures et les autocars sur 600 et 800 kilomètres) d'arrêt pour un repas rapide**

Mode	Vitesse moyenne (km/h)	Distance de centre-ville à centre-ville		
		400 km	600 km	800 km
Voiture	100	4 :00	6 :30	8 :30
Autocar	85	4 :43	7 :34	9 :55
Train rapide	150	2 :40	4 :00	5 :20
TGV	280	1 :26	2 :09	2 :56
Avion	800	2 :20	2 :35	2 :50

Comme la plupart des grandes gares se situent au cœur d'une ville, le train a l'avantage de transporter les voyageurs de centre-ville à centre-ville. Pour tous les voyageurs qui n'ont toutefois pas un centre-ville comme point de départ ou de destination finale, le temps total de déplacement peut être plus court s'ils combinent l'avion avec une voiture de location ou un taxi. La substitution d'un train à grande vitesse à un train rapide peut faire ou ne pas faire la différence pour cette catégorie de voyageurs. La différence en temps de déplacement est de toute façon faible s'il est mesuré de centre-ville à centre-ville.

3. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

Le transport affecte l'environnement de plusieurs façons différentes. Les paramètres les plus importants dans le contexte du transport interurbain de voyageurs sont les gaz d'échappement (NO_x, SO_x, particules et COV), le bruit et le changement climatique. L'occupation des sols, notamment les nuisances esthétiques et l'effet de barrière, peut aussi avoir son importance.

Le calcul des effets environnementaux des différents modes de transport de voyageurs doit s'effectuer, dans le contexte des investissements en infrastructures et de leur planification, en tenant compte des progrès technologiques qui devraient se produire pendant la période d'amortissement ainsi que de la mise en œuvre progressive de normes environnementales de plus en plus sévères. La meilleure façon de faire serait de calculer le coût des émissions année par année et d'actualiser les coûts futurs. Dans un monde de progrès technique accéléré, le résultat dépend dans une large mesure de la longueur de la période d'amortissement et du choix du taux d'actualisation. La combinaison d'une période longue avec un taux d'actualisation peu élevé (par exemple 60 ans et 2 ou 3 pour cent) donne un poids plus important aux technologies futures respectueuses de l'environnement, tandis qu'un taux d'actualisation élevé, de 4 ou 6 pour cent par exemple, donne des résultats qui sont davantage déterminés par les différences, actuellement assez marquées, entre les modes. La majorité des experts s'attendent à ce que ces différences s'amenuisent au fil du temps et que tous les modes deviennent plus propres et moins gourmands en énergie.

Aucun expert ne peut toutefois dire à quoi les nouveaux véhicules et moteurs ressembleront d'ici 30 ou 50 ans. Ils peuvent au mieux prévoir plus ou moins exactement quelles architectures et quels moteurs seront la norme pour les nouveaux navires et véhicules dans 10 ou 15 ans. Étant donné que les trains et les avions ne sont généralement pas envoyés à la casse avant d'avoir atteint l'âge de 25 ou 30 ans, la plupart de ceux qui seront produits en 2025 par exemple serviront encore en 2045, soit dans 36 ans, mais ne représenteront plus alors qu'une petite partie du parc. La durée de vie des voitures et des autocars est moins longue, mais les voitures récentes peuvent bien, en moyenne, atteindre 15 à 20 ans d'âge avant d'être remplacées. Les véhicules électriques, dont les moteurs et systèmes de transmission sont plus durables, pourraient à l'avenir atteindre un âge encore plus avancé.

Il est possible de tourner le problème posé par la non-prévisibilité des technologies futures et le choix du taux d'actualisation en fondant l'évaluation des performances environnementales à long terme des différents modes sur les technologies qui semblent promises à être les meilleures disponibles en 2025, soit dans 16 ans, et qui, du fait qu'elles devraient dominer le monde des transports au milieu de la période d'amortissement, permettent d'estimer assez valablement l'impact environnemental d'un mode pendant une période de 50 à 60 ans. Cette méthode simplifiée est utilisée dans les chapitres qui suivent pour esquisser les inégalités à long terme de l'impact environnemental par voyageur/kilomètre.

4. GAZ D'ÉCHAPPEMENT

Tous les types de moteur à combustion interne et toutes les centrales électriques qui brûlent des combustibles fossiles ou des biocombustibles produisent des gaz d'échappement. Le volume total admissible des gaz d'échappement émis par les voitures et les autocars a été réduit de façon radicale ces 15 dernières années et continuera à diminuer. Il est donc permis de s'attendre à ce qu'en 2025, les émissions des véhicules neufs soient à ce point réduites que l'impact cumulé de tous les véhicules neufs soit négligeable. Étant donné toutefois que les voitures et les autocars ont une durée de vie de 15 à 20 ans, il faudra attendre 2035 pour que tout le parc soit propre. La part des véhicules routiers électriques et voitures hybrides rechargeables pourrait alors être importante.

L'électricité consommée par les trains et à l'avenir aussi par un nombre croissant de voitures est produite entre autres par des centrales au charbon qui, dans la plupart des pays, sont les plus nombreuses à alimenter le réseau de distribution. Certaines centrales émettent encore des quantités énormes de soufre et de NO_x. Beaucoup de centrales européennes, dont la majorité se situent en Europe orientale, émettent plus de 100 000 tonnes de SO₂ par 800 à 12 000 MW et plusieurs centrales, britanniques en particulier, émettent plus de 20 000 tonnes de NO_x par an (Entec, 2008). Les pires d'entre elles émettent donc plus de 20 grammes de SO₂ et 3 grammes de NO_x par kilowatt/heure produit. Comme ces centrales auront toutefois soit été arrêtées, soit été « nettoyées » d'ici 2025, les émissions réglementaires des centrales électriques auront elles aussi été ramenées à long terme à des niveaux durables.

Il semble donc permis de ne pas tenir compte de ce qu'il restera, le cas échéant, des émissions de gaz d'échappement générées par les véhicules automobiles et la production d'électricité dans une comparaison sur le long terme des différents modes de transport terrestres.

La situation est plus compliquée dans le domaine du transport aérien, parce que les émissions de NO_x produites par les avions sont préoccupantes à long terme, en raison de leur contribution au changement climatique. La question de ces émissions sera donc abordée dans le chapitre traitant des gaz à effet de serre.

5. BRUIT

Les problèmes posés par le bruit des véhicules et autres engins de transport varient selon le lieu et il est donc difficile, sinon impossible, de chiffrer les coûts moyens du bruit imputables aux différents modes. Quelques observations générales n'en restent pas moins possibles. Les déplacements interurbains effectués en voiture ou autocar empruntent généralement des autoroutes ou autres routes rapides qui permettent de circuler à des vitesses égales ou supérieures à 90 km/h. À ces vitesses, le bruit du roulement l'emporte sur le bruit des moteurs, ce qui implique que la conversion des véhicules routiers à l'énergie électrique n'aura guère d'incidence sur les niveaux d'équivalents de bruit. Par ailleurs, les autoroutes et autres grands axes routiers contournent fréquemment les petites villes et autres agglomérations et le nombre de victimes du bruit routier est donc moins élevé que celui des victimes du bruit produit par les lignes de chemin de fer qui, pour des raisons historiques, traversent souvent le cœur des villes. Les nouvelles lignes à grande vitesse évitent toutefois de traverser des petites villes où les TGV ne s'arrêtent de toute façon pas.

Il semble techniquement possible de réduire de 50 pour cent le bruit extérieur des trains et des avions et d'aller plus loin encore en utilisant des revêtements routiers absorbants et en installant des absorbeurs de bruit le long des lignes de chemin de fer. Les murs anti-bruit peuvent réduire fortement l'impact, s'ils sont relativement proches du lieu d'où le bruit émane. Les gens qui en sont plus éloignés seront affectés par le bruit de fond diffus que les barrières ne peuvent pas arrêter. Pour ce qui est du transport aérien, la seule protection possible est d'améliorer l'isolation, des vitrages en particulier.

Le bruit produit par les gros véhicules est moins fort par voyageur/kilomètre qu'un bruit de même intensité produit par un plus petit véhicule. Un train qui peut transporter des centaines de voyageurs génère donc moins de bruit par voyageur/kilomètre que des voitures, alors même qu'ils font beaucoup plus de bruit là où ils passent. Sur les routes, le bruit ambiant est toutefois causé principalement par les camions et la contribution marginale d'une voiture supplémentaire circulant sur une route déjà chargée est faible.

Il faut conclure de ce qui précède que le coût marginal social généré par le bruit de la circulation ne peut pas être pris en compte dans une comparaison généralisée des différents modes. Un transfert d'un mode vers un autre peut, selon le lieu, aggraver ou atténuer l'impact sur la santé humaine.

6. AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET PAYSAGES

L'occupation des sols et l'impact paysager varient dans une large mesure selon le lieu, mais quelques observations générales n'en restent pas moins possibles.

L'avion consomme, pour des raisons évidentes, moins d'espace par passager/kilomètre que les autres modes de transport de voyageurs. Un vol supplémentaire ne cause généralement pas de dommage supplémentaire à ce point de vue, mais l'augmentation du trafic peut quand même, après un certain temps, nécessiter la construction d'une piste supplémentaire ou d'un nouvel aéroport.

Les voitures, autocars et trains classiques qui effectuent du transport interurbain partagent leurs infrastructures avec des véhicules qui rallient d'autres destinations ou, dans une certaine mesure, effectuent du transport local. L'impact marginal sur l'utilisation des sols est en règle générale nul et ce n'est que si la congestion appelle à la mise en place d'infrastructures supplémentaires que l'augmentation du trafic interurbain va faire une différence. Si le renforcement de la capacité s'opère par addition d'une nouvelle voie ou ligne, l'effet marginal exercé sur l'occupation des sols est limité et aucune nouvelle barrière ne voit le jour.

La mise en circulation de trains à grande vitesse requiert la construction de lignes spécialement adaptées à ce type de trains là où il n'en existe pas déjà. La grande vitesse ferroviaire nécessite des courbes à large rayon et des pentes peu accusées¹. Le rayon de courbure horizontale doit être d'au moins 5.5 kilomètres pour autoriser des vitesses de 300 kilomètres et ne devrait pour bien faire pas être inférieur à 7 kilomètres (UIC, 2008a)². Les lignes à grande vitesse suivent pour cette raison souvent des tracés entièrement nouveaux, même si elles peuvent en partie s'accoler à des lignes existantes ou à des autoroutes. Leur construction mobilise donc des terres supplémentaires et crée des nouvelles barrières.

La construction d'une nouvelle ligne à grande vitesse peut avoir pour effet de libérer de la capacité au bénéfice d'autres types de trains sur les infrastructures préexistantes. Les apôtres de la grande vitesse ferroviaire allèguent souvent que la création de nouveaux corridors permet de transporter davantage de marchandises sur des lignes autrement encombrées et avoir pour effet indirect d'induire un transfert de la route vers le rail qui réduit l'impact environnemental global du transport de marchandises. Cet effet ne peut toutefois se matérialiser que s'il existe une demande latente de transport par chemin de fer qu'un manque de capacité ne permettait précédemment pas de satisfaire.

Le chemin de fer doit, en théorie, à la grande capacité des trains de nécessiter beaucoup moins de terrain que la route pour transporter un nombre donné de voyageurs (à cette restriction près que les autocars ont besoin de moins d'espace que les voitures). Pour pouvoir exploiter pleinement cet avantage, tous les trains doivent toutefois rouler à la même vitesse et s'arrêter dans les mêmes gares, parce que le mélange de trains rapides et de trains lents de même que de trains de voyageurs et de trains de marchandises peut fortement réduire la capacité d'un corridor ferroviaire.

7. CHANGEMENT CLIMATIQUE

La contribution du secteur des transports au changement climatique semble être le seul paramètre environnemental qui soit source de préoccupations majeures à long terme. La suite du présent rapport va donc tenter de déterminer, si le transfert modal d'une partie du trafic interurbain de voyageurs peut être bénéfique au climat. Les paragraphes qui suivent vont donc commencer par faire l'inventaire des données existantes et des hypothèses avancées au sujet de l'efficacité énergétique des différents modes pour aborder ensuite la question du calcul de l'effet marginal à court terme sur les émissions de gaz à effet de serre et analyser, enfin, l'impact des taux d'occupation sur les émissions effectives.

Le calcul des émissions de carbone produites de la source à la roue est une entreprise complexe. Dans le présent bref rapport, les émissions, directes et indirectes, produites par le transport par chemin de fer, par route et par air sont calculées du réservoir à la roue pour les voitures diesels et à essence et du combustible à l'électricité pour les trains et les voitures électriques. Il s'en suit qu'il n'est pas tenu compte, pour les carburants routiers et aériens, de leur extraction, de leur raffinage et de leur livraison aux centres de distribution ni, pour l'électricité, de l'extraction du charbon, de son transport jusqu'aux centrales et des pertes subies sur le réseau de transport. Dans les deux cas, ces émissions représentent de 10 à 15 pour cent des émissions de la source à la roue.

8. TRAINS ÉLECTRIQUES

Les trains à passagers rapides d'aujourd'hui circulant à la vitesse moyenne de 150 km/h consomment 0.031 à 0.045 kWh par siège/kilomètre (Lukaszewicz et Andersson, 2006), tandis que les trains à grande vitesse roulant à plus ou moins 250 km/h consomment 0.041 à 0.065 kWh par siège/kilomètre (RSSB, 2007). Le Shinkansen 700 japonais ne consomme pas plus de 0.029 kWh, parce que la largeur des voitures et la longueur des trains permettent d'installer plus de sièges par mètre de longueur et d'arriver à un nombre total de sièges très élevé. Comme l'écartement adopté par de nombreux pays, notamment dans la plus grande partie de l'Europe, ne permet pas le passage de voitures larges capables d'accueillir 2 + 3 voyageurs par rangée, les paragraphes qui suivent traitent des trains à 2 + 2 voyageurs par rangée.

Les trains de voyageurs ont besoin d'énergie pour :

- accélérer jusqu'à atteindre leur vitesse de route ;
- vaincre la résistance à l'avancement ;
- franchir des pentes ;
- alimenter leurs systèmes de contrôle ;
- éclairer, chauffer, rafraîchir et ventiler les voitures.

L'énergie nécessaire pour accélérer jusqu'à atteindre la vitesse de croisière est fonction de la masse et de la vitesse du train. Cette énergie cinétique augmente avec le carré de la vitesse et il en est de même de la résistance aérodynamique, c'est-à-dire de la résistance opposée par l'air au déplacement du train (UIC, 2008b). Un train aura donc besoin de quatre fois plus d'énergie pour rouler à 300 km/h qu'à 150 km/h (toutes autres choses étant égales par ailleurs).

Le secteur ferroviaire s'est engagé à réduire la consommation moyenne d'électricité des différents types de train en investissant dans des nouvelles technologies et en améliorant l'efficacité énergétique de ses activités. La CCFE, communauté des chemins de fer et gestionnaires d'infrastructures ferroviaires européens, s'est engagée à réduire les émissions de CO₂ par voyageur et tonne/kilomètre de 30 pour cent entre 1990 et 2020. Les opérateurs vont pour ce faire utiliser des nouvelles technologies ou des technologies améliorées, pratiquer l'« écoconduite », gérer activement leur trafic et rationaliser leurs horaires (UIC, 2008b).

Plusieurs compagnies de chemin de fer ont déjà des réductions de cette ampleur à mettre à leur actif. Au Royaume-Uni, la consommation spécifique d'énergie primaire des transports de voyageurs par chemin de fer a diminué de 25 pour cent entre 1995 et 2006, tandis que la Deutsche Bahn fait état d'une réduction d'un tiers dans les secteurs du transport de marchandises et du transport régional de voyageurs entre 1990 et 2007 (UIC et CCFE, 2008). La consommation d'énergie primaire n'a toutefois absolument pas diminué dans le trafic voyageurs grandes lignes, sans doute parce que sa vitesse moyenne a augmenté.

La consommation par siège/kilomètre est fonction :

- de la longueur du train ;
- du nombre de sièges par mètre de longueur du train ;
- de l'aérodynamisme du train ;
- (de la masse) ;
- de la longueur et du gabarit des tunnels ;
- des vitesses moyenne et de pointe ;
- du nombre d'arrêts et d'accélération/décélération motivées par les variations de la vitesse autorisée ;
- de l'efficacité des moteurs et du degré de récupération d'énergie au freinage.

La réduction de la résistance à l'avancement est la mesure qui permet le mieux de réduire la consommation d'énergie à grande vitesse. Le nez et la queue des trains doivent être convenablement profilés. Le carénage des bogies, l'élimination ou le masquage des équipements en toiture et l'installation de soufflets d'intercirculation sont d'autres mesures elles aussi importantes. Toutes ces mesures exercent un effet réducteur sur les coûts dès les 150 à 250 km/h et devraient être réclamées par tous les opérateurs attentifs aux coûts et mises en œuvre par tous les constructeurs de matériel ferroviaire. Le fait que la consommation d'énergie augmente considérablement avec la vitesse (toutes autres choses étant égales par ailleurs) donne toutefois à penser que certaines solutions très coûteuses ne sont rentables que sur les trains à grande vitesse.

L'incidence des tunnels sur la résistance aérodynamique est fonction de la largeur du tunnel et est plus nette dans les tunnels à voie unique que dans les tunnels à double voie. Les tunnels peuvent, s'ils représentent 10 pour cent de la longueur d'une ligne à grande vitesse, augmenter la traînée totale de 8 pour cent et la consommation totale d'énergie de 5 pour cent.

Le nombre de sièges par mètre de longueur est un autre facteur d'importance en termes de consommation d'énergie (quelle que soit la vitesse). Le parcours à grande vitesse de distances de moyenne longueur pourrait permettre aux opérateurs de gagner un peu d'espace en remplaçant un service restaurant par la distribution d'encas dans les voitures.

Le Tableau 2 montre que la différence entre la consommation d'énergie des trains interurbains classiques et celle des trains à grande vitesse est très variable. Les trains à grande vitesse sont réputés nécessiter de 9 à 150 pour cent d'énergie en plus par siège/kilomètre.

Tableau 2. **Consommation d'énergie des trains classiques et des trains à grande vitesse annoncée dans les ouvrages spécialisés**

Source	Unité	IC	TGV	Différence (%)
Van Essen <i>et al.</i> (2003)	MJ/siègekm	0.22	0.53	+ 141
Kemp (2004)*	Litre/siègekm	46 (225 km/h)	88 (350 km/h)	+ 91
Rail White Paper (UK, 2007)	Énergie/siègekm	200 km/h	350 km/h	+ 90
Kemp 2007 (figure 27)		200 km/h	300 km/h	+ 45
Network Rail (2009)	gCO ₂ /siègekm	11.7	12.8	+ 9
Network Rail (2009)**	kWh/siègekm	0.028 (200 km/h)	0.033 (300 km/h)	+ 18
Lukaszewicz et Andersson (2009)***	kWh/siègekm	0.022 (180 km/h) ****	0.027 – 0.031 (250 km/h)	+ 32

* Chiffre approximatif inféré d'un Graphique.

** Trains futurs, Hitachi Super Express vs Alstom AGV (650 voyageurs).

*** Futur train à grande vitesse.

**** Evert Andersson, communication personnelle.

La fourchette est de toute évidence beaucoup trop large. Network Rail (2009) avance que la résistance à l'avancement entre pour 68 pour cent dans l'énergie consommée par un train grandes lignes, tandis que l'inertie et les fonctions de confort en absorbent respectivement 10 et 22 pour cent, deux pourcentages auxquels l'augmentation de la vitesse de desserte d'un service de point à point ne changera pas grand chose. Étant donné que la résistance à l'avancement est dominée à plus de 200 km/h par la traînée, qui augmente à peu près par le carré de la vitesse, il semble raisonnable de penser que le relèvement de la vitesse de 200 à 300 km/h va faire augmenter la consommation d'électricité de 85 pour cent (toutes autres choses étant égales par ailleurs). Ce chiffre est proche de celui de Zängl (1993) qui affirme qu'un ICE allemand consomme 83 pour cent d'énergie en plus par siège/kilomètre à 300 km/h (vitesse constante) qu'à 200 km/h.

L'auteur du présent rapport n'a, dans aucun ouvrage spécialisé, trouvé de courbe du coût marginal des moyens techniques d'amélioration de l'efficacité énergétique des trains de voyageurs et a demandé à plusieurs experts, sans recevoir de réponse à sa question, ce qu'il était possible de faire de plus sur les trains à grande vitesse que sur les nouveaux trains classiques. Il semble toutefois vraisemblable que la courbe du coût marginal de la réduction de la traînée soit assez plate³.

La consommation des trains à grande vitesse ne peut se réduire par rapport à celle des trains rapides classiques que s'ils acceptent de supporter un coût marginal de réduction plus élevé et/ou de s'allonger et d'installer plus de sièges par mètre de longueur, ce qui n'est possible, si les opérateurs

cherchent à maximiser leurs profits, qu'en remplaçant un service restaurant par un service de distribution d'encas à la place dont les voyageurs seraient disposés à se satisfaire là où les temps de parcours sont courts. En ce qui concerne la longueur des trains, les opérateurs peuvent répondre à une demande qui va vers le train à grande vitesse plutôt que le train classique en ajoutant des voitures et/ou en augmentant la fréquence des services.

Partant de ces considérations, la différence entre l'énergie consommée par siège/kilomètre par les futurs trains grandes lignes roulant à 200 km/h, d'une part, et les trains à grande vitesse circulant à 300 km/h, d'autre part, pourrait osciller entre 40 et 50 pour cent, étant entendu que les uns et les autres s'arrêtent dans un même nombre de gares intermédiaires. Le calcul se fonde sur l'hypothèse que la réduction se réalise en rendant les trains à grande vitesse plus longs que les trains classiques, toutes autres choses étant égales par ailleurs.

Le transfert d'une partie du trafic d'une ligne existante parcourable à 150 km/h vers une nouvelle ligne à grande vitesse autorisant des vitesses moyennes de l'ordre de 280 km/h fait toutefois augmenter la quantité d'énergie consommée par siège/kilomètres d'au moins 60 pour cent (avec utilisation de technologies modernes dans les deux cas). L'incidence de la traversée de tunnels représentant 10 pour cent de la longueur de la ligne sur la traînée est également prise en compte dans le calcul de l'augmentation de la consommation d'électricité entraînée par la grande vitesse. Dans les calculs ci-après, le nouveau train rapide de 2025 (150 km/h) consomme 0.018 kWh et le train à grande vitesse (280 km/h) 0.029 kWh par siège/kilomètre.

L'incidence de la consommation d'électricité sur les émissions de CO₂ fera l'objet d'un des chapitres suivants.

9. AVIONS

Les avions modernes consomment en moyenne 0.029 à 0.039 litre par siège/kilomètre⁴. La consommation est toutefois beaucoup plus élevée sur les vols courts que sur les vols longs.

L'architecture des fuselages et l'efficacité des moteurs devraient s'améliorer nettement et l'utilisation de matériaux composites plus légers se développer au cours des prochaines décennies. « *Clean Sky* » (ciel propre) est un projet de recherche et développement lancé dans le cadre du septième programme-cadre de recherche de la Commission Européenne. Le Conseil consultatif pour la recherche aéronautique en Europe (ACARE) estime que le « verdissage » du transport aérien implique une mise au point de technologies réductrices de l'impact environnemental du transport aérien propres à diminuer de moitié ses émissions de CO₂ et de 80 pour cent ses émissions de NO_x. Les émissions de suie, de vapeur d'eau et de particules devront elles aussi diminuer. Ces objectifs devront être atteints en 2020.

L'Association du transport aérien international (IATA) est beaucoup moins optimiste, mais croit qu'il devrait être possible de réduire la consommation de 1.5 pour cent en moyenne par an jusqu'en 2020⁵. La différence entre les chiffres d'ACARE et de l'IATA peut sans doute s'expliquer, du moins en partie, par le fait qu'ACARE se focalise sur les nouvelles technologies et que les prévisions de l'IATA sont des moyennes valables pour l'ensemble de la flotte.

ATOC (2009) calcule, en se fondant sur le rapport relatif aux responsabilités de l'entreprise établi par Easyjet en 2006, qu'un nouvel Airbus A319 émet quelque 115 g de CO₂ par siège/kilomètre sur un vol de 300 kilomètres et 85 g par siège/kilomètre sur un vol deux fois plus long en consommant respectivement 0.046 et 0.034 litre de kérosène. Boeing allègue que son nouveau 7 E 7 « *Dreamliner* » ne consommera pas plus de 0.017 litre par siège/kilomètre, tandis qu'Airbus prétend que le A380 consommera moins de trois litres par 100 passagers/kilomètre (RSSB, 2007), soit 0.021 litre par siège/kilomètre à 70 pour cent de taux de remplissage. Ces chiffres sont valables pour les vols long-courriers et devraient sans doute être multipliés par 1.5 pour avoir la consommation de carburant des vols courts (RSSB, 2007).

ATOC (2009) avance, en s'appuyant sur une étude réalisée à la demande du *British Committee on Climate Change* (Comité britannique pour le changement climatique), qu'il est possible de réduire de 35 pour cent entre 2006 et 2025 les quantités de CO₂ émises au cours des vols court-courriers pour les ramener à 62 g CO₂ par siège/kilomètre. Ce dernier chiffre correspond à 0.025 litre par siège/kilomètre et est celui qui sera utilisé dans le présent rapport.

Les avions émettent d'autres gaz et substances qui contribuent au réchauffement climatique, notamment des NO_x, de la vapeur d'eau et des particules qui forment de l'ozone et des traînées de condensation et peuvent contribuer à la formation de cirrus. Pour tenir compte de ces effets, l'impact global du transport aérien est souvent calculé en multipliant le forçage radiatif du CO₂ émis par les avions par un facteur de 1.5-2.5. Le GIEC suggère même, dans une étude plus ancienne (1999), de donner à ce facteur une valeur de 2.7. Le progrès technique permettra toutefois de réduire nettement ces émissions, celles de NO_x plus sans doute que celles de CO₂, d'ici 2025. Il importe aussi de souligner que les avions qui effectuent des vols courts ne volent à haute altitude que pendant une assez petite partie du trajet et n'atteignent souvent pas la troposphère, de sorte qu'il se justifie d'utiliser un facteur relativement peu élevé. Econ (2008) propose de lui donner une valeur de 1.3, mais le présent rapport le fixe au niveau de 1.5.

10. VOITURES PARTICULIÈRES

Les voitures neuves vendues en Europe en 2008 émettent en moyenne 154 grammes de CO₂ par kilomètre lors du cycle d'essais officiel de l'Union Européenne. Les émissions sont sans doute plus importantes sur route, en particulier sur celles qui sont encombrées. Une Directive communautaire dispose que les émissions des voitures neuves de dimensions (masse) moyennes devront être réduites à 130 g/km en 2015 et pourraient être plafonnées à quelque 95 g/km en 2020, ce qui implique que les voitures neuves consommant du carburant fossile, y compris les électriques hybrides, ne devront émettre en 2025 que 85 g en moyenne en étant conduites dans les conditions prévues par le cycle d'essais européen. Les émissions produites en trafic interurbain pourraient cependant différer quelque peu de celles qui sont enregistrées pendant le cycle d'essais.

La vitesse a un impact marqué sur la consommation, non seulement des trains, mais aussi de tous les autres types de véhicules. Des tests réalisés par l'administration nationale suédoise des routes (modèles de 2001-2002) révèlent qu'à vitesse constante, les émissions sont de 30 pour cent plus importantes à 110 km/h qu'à 70 km/h. Les voitures d'aujourd'hui émettent néanmoins plus pendant la

partie urbaine que pendant la partie rurale des essais, mais ceci pourrait changer quand la plupart des voitures seront équipées d'un système d'arrêt/démarrage et d'un système de récupération de l'énergie de freinage. Les hybrides intégraux auront un impact beaucoup plus fort sur la consommation en milieu urbain qu'en rase campagne. A long terme, la différence entre la consommation moyenne enregistrée pendant la partie urbaine, d'une part, et rurale, d'autre part, du cycle d'essais sera vraisemblablement faible.

Il convient en outre de rappeler que la partie rurale du cycle n'amène pas à circuler longuement à des vitesses « autoroutières » et que les voitures modernes de demain seront équipées de régulateurs de vitesse ou d'autres dispositifs qui aideront les conducteurs à stabiliser leur vitesse et éviter les pertes d'efficacité inhérentes à la variation de la vitesse. Le présent rapport pose donc en hypothèse qu'en 2025, une voiture neuve moyenne consommant du carburant fossile émettra 105 grammes de CO₂ par kilomètre en circulant sur une autoroute non encombrée où la vitesse est limitée à 120 km/h et où la vitesse moyenne s'élève à 110 km/h. Ce volume excède de 21 grammes par siège/kilomètre, soit le 24 pour cent, le volume maximum que les voitures neuves pourront produire en 2025 pendant le cycle d'essais.

Les hybrides électriques rechargeables et les voitures tout électriques à accumulateurs chargeables depuis le réseau pourraient s'être généralisés en 2025. Si leur traînée aérodynamique et leur résistance à l'avancement sont comparables à celles des voitures de la même génération consommant des carburants fossiles, il est permis de penser que ces véhicules électriques consommeront en moyenne quelque 0.15 kWh par kilomètre en roulant comme le prévoit le cycle d'essais européen (King, 2007 ; Hacker *et al.*, 2009). Sur autoroute, la consommation peut monter à 0.19/0.20 kWh par kilomètre. Le présent rapport pose donc en hypothèse que la consommation moyenne s'élève à 0.2 kWh par véhicule/kilomètre, soit 0.04 kWh par siège/kilomètre, en circulation interurbaine. L'incidence de l'électricité tirée du réseau sur les émissions de CO₂ fait l'objet d'un des chapitres suivants.

11. AUTOCARS DE LIGNE

La société britannique Megabus déclare que ses cars Megabus à étage consomment en moyenne 0.577 litre par kilomètre, soit 0.0063 litre par siège/kilomètre, en rencontrant des conditions de circulation vraisemblablement hétérogènes (Megabus ne donne aucune indication à ce sujet)⁶. *Norgens Naturvernforbund* (2008) annonce, en se fondant sur des chiffres fournis par Volvo, que le Volvo 9700 consomme, en moyenne annuelle, 0.28 litre par véhicule/kilomètre, soit 0.0054 litre par siège/kilomètre, pour effectuer du transport interurbain.

Le potentiel d'amélioration à long terme actuel semble tourner autour des 25 pour cent⁷, ce qui veut dire qu'un autocar neuf circulant sur autoroute à vitesse plus ou moins constante et en marquant peu d'arrêts consommerait 0.21 litre par véhicule/kilomètre, ou 0.0040 litre par siège/kilomètre, et émettrait 10.5 grammes de CO par siège/kilomètre de moins en 2025. Une conduite écologique permettrait de réduire encore davantage la consommation de carburant, mais il n'en est pas tenu compte dans le présent rapport.

12. ÉMISSIONS INDIRECTES INDUITES PAR LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ

Les études comparatives de l'impact des différents modes fondent souvent leurs calculs sur les émissions moyennes générées par la production de l'électricité consommée par les trains électriques en partant du point de vue qu'ils sont alimentés par cette forme d'énergie. L'hypothèse peut convenir pour qui veut chiffrer l'impact du trafic pendant une année (passée) donnée, mais l'évaluation doit s'appuyer, s'il s'agit d'analyser les conséquences d'investissements réalisés pour faciliter un transfert modal, sur l'impact marginal de l'augmentation ou contraction de la demande sur la production et les émissions.

L'augmentation de la demande d'électricité peut être satisfaite par une augmentation du nombre d'éoliennes ou d'autres moyens de production d'électricité sans dégagement de carbone, mais les centrales au charbon resteront jusque dans un avenir prévisible la forme marginale de production d'électricité dans la plupart des pays et régions, ce qui implique qu'une modification de la demande va normalement faire augmenter ou diminuer la consommation de charbon ou de lignite. L'application à grande échelle de techniques de capture et de stockage du carbone pourrait changer cela à long terme, mais il est à l'heure actuelle impossible de savoir dans quelle mesure ces techniques seront appliquées en 2025, si tant est qu'elles le soient. En l'absence de techniques permettant de capturer et stocker les émissions de toutes les centrales brûlant des combustibles fossiles qui alimentent un réseau de distribution, toute augmentation de la demande va, à court et moyen terme, ralentir le remplacement du charbon par des sources d'électricité plus respectueuses de l'environnement.

Il est dans ce contexte nécessaire aussi de se pencher sur l'incidence d'un recul de la demande d'électricité, qu'il soit induit par une récession ou une amélioration de l'efficacité énergétique, sur les émissions de CO₂. A court terme, les centrales dont les coûts variables de production sont les plus élevés seront les premières à fermer leurs portes. Ces centrales sont normalement, et plus spécialement en régime d'échange de droits d'émission, des centrales qui brûlent du lignite ou du charbon. Les éoliennes et les centrales hydroélectriques ne vont pas réduire leur production en situation de recul de la demande. La Directive 2006/32/CE de l'Union Européenne relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques recommande de multiplier l'effet des améliorations de l'efficacité électrique par 2.5 pour calculer la réduction de la consommation d'énergie primaire⁸. Il serait indéniablement très inattendu d'utiliser des valeurs marginales quand la demande diminue et des valeurs moyennes quand elle augmente, mais c'est pourtant ce que les chemins de fer font parfois.

Il ressort clairement de ce qui précède que dans une perspective systémique, un transfert de l'avion, de la voiture et de l'autocar vers le train électrique ferait diminuer la demande de kérosène, de gazole et d'essence et augmenter la demande de charbon et de gaz.

D'aucuns allèguent que la mise en place de systèmes d'échange de droits d'émission de dioxyde de carbone condamne la prise en compte de l'impact marginal à l'obsolescence. Les émissions ne devront pas dépasser le plafond fixé quelles que soient les proportions dans lesquelles la demande d'électricité augmente et cette augmentation aurait pour seul effet de faire augmenter le prix des

quotas d'émissions pour cause de rareté. Ce genre d'argumentation serait raisonnable, si le plafonnement avait pour but final de ramener les émissions de carbone des pays de l'Annexe 1 à un niveau inférieur de 80 ou 90 pour cent à celui de 1990. Les plafonds dont il est discuté en Europe et aux États-Unis sont toutefois des objectifs intermédiaires pour 2020 qui ne sont que les premiers pas à franchir sur le long chemin menant à la durabilité.

Si la rareté fait augmenter de beaucoup le prix d'équilibre du carbone, il y a de bonnes raisons de craindre que les responsables politiques révisent leurs plans à long terme actuels. Un prix élevé ou en augmentation rapide peut les faire douter de l'avenir des systèmes de plafonnement et d'échange et les plafonds pourraient être fixés pour la phase suivante à des niveaux plus élevés que ceux auxquels ils se seraient situés avec un prix du carbone moins élevé (WWF, 2009).

L'échange des droits d'émission bute sur une autre difficulté née du fait que le système communautaire d'échange de quotas d'émission s'applique aux émissions de CO₂ générées par la production d'électricité et pas à celles qui sont produites par les voitures et les autocars. Le transport aérien sera inclus dans son champ d'application en 2012. À l'inverse, le système qui doit être mis en œuvre aux États-Unis (projet de loi Waxman-Markey)⁹ couvre les émissions imputables non seulement à l'énergie fossile utilisée pour produire de l'électricité, mais aussi aux carburants livrés à tous les modes de transport (approche en amont). Comme toutes les émissions produites par les transports relèvent du système, il ne serait pas inconcevable qu'une augmentation de la demande de carburants routiers ne modifie pas le plafond et il n'y aurait alors pas à se préoccuper des quatre-quatre gros consommateurs de carburant. Il est dans un tel cas toutefois aussi évident qu'un prix élevé empêchera les responsables politiques de demain de s'en tenir à la ligne tracée dans la loi qui veut que les émissions diminuent de 80 pour cent entre 2005 et 2050.

Il n'est en aucun cas permis d'exciper du fait que les systèmes de plafonnement et d'échange réduisent l'impact marginal sur le climat à zéro en faveur d'un seul mode de transport (chemin de fer) et le chemin de fer n'aurait, s'il en est excipé en faveur de tous, aucune raison d'affirmer que la grande vitesse ferroviaire présente plus d'avantages en termes d'environnement que la route ou le transport aérien. Il convient donc de conclure que l'effet marginal à long terme sur les gaz à effet de serre est la base de comparaison la plus appropriée des performances environnementales des différents modes de transport.

Les émissions marginales générées par la production d'électricité peuvent varier quelque peu en fonction du combustible utilisé (lignite, charbon ou gaz naturel) comme source marginale. D'autres sources peuvent, dans certains systèmes, se substituer à titre temporaire au charbon, notamment quand la demande est faible ou que les centrales hydroélectriques tournent à plein régime. L'efficacité des centrales au charbon utilisées de façon marginale peut aussi varier d'une période et d'un réseau à l'autre.

Une politique d'atténuation du changement climatique ne peut aboutir que si les centrales au charbon sont mises progressivement à l'arrêt ou équipées d'un système de capture et de stockage du carbone. Le présent rapport postule un abandon du lignite d'ici 2025 (ou l'élimination de ses émissions par un système de capture et de stockage). À plus longue échéance, le gaz naturel pourrait s'être substitué au charbon ou toutes les centrales au charbon être équipées d'un système de capture et de stockage du carbone. Une politique fructueuse d'atténuation du changement climatique visant à réduire les émissions de 80 pour cent d'ici 2050 est une politique qui aura amené à abandonner le charbon (sans système de capture et de stockage du carbone) dès 2035 pour le remplacer par des énergies renouvelables, de l'électricité nucléaire et du gaz naturel qui deviendrait alors le nouveau carburant de production marginal.

La quantification des émissions produites pendant les 50 années sur lesquelles un investissement en nouvelles infrastructures ferroviaires est amorti peut reposer sur l'hypothèse que le combustible marginal de production est du charbon pendant les deux premières décennies et du gaz naturel pendant les trois dernières. Une centrale à condensation brûlant du charbon dont l'efficacité de production s'élève à 40 pour cent émet environ 800 grammes de CO₂ par kWh d'électricité produite, tandis qu'une centrale au gaz naturel dont l'efficacité monte à 58 pour cent en émet 380 grammes par kWh produit. La moyenne calculée sur l'ensemble de la période se situe donc au niveau de 530 grammes par kWh, un chiffre qui ne tient toutefois pas compte du fait qu'il peut y avoir de bonnes raisons de donner plus de poids aux émissions du futur proche qu'à celles qui seront produites dans 30 ou 40 ans.

D'autres estimations pourraient être tenues pour plausibles et devraient évidemment être appliquées tant aux trains électriques qu'aux véhicules routiers consommant de l'électricité fournie par le réseau.

13. EFFETS MARGINAUX DE L'AUGMENTATION DE LA DEMANDE DE CARBURANTS FOSSILES

Les carburants sans carbone ou à faible teneur en carbone manquent. Le potentiel global de production de biocarburants de première et seconde générations est de loin inférieur à la demande actuelle de carburants classiques. Il s'en suit qu'une modification de la demande de carburants routiers va se traduire par une augmentation ou une diminution de l'utilisation de carburants fossiles tels que l'essence et le gazole. Le transport aérien dépend encore davantage des carburants dérivés du pétrole. Comme ils sont plus facilement remplaçables dans d'autres applications, les carburants fossiles seront les derniers à être abandonnés en cas de mise en place de systèmes d'échange des droits d'émission (ou de taxation à taux égal).

L'Union Européenne attend toutefois de ses États membres que 10 pour cent de leur demande de carburants routiers soit satisfaite par des biocarburants ou de l'électricité à partir de 2020. La plupart des États membres se conformeront sans doute à cette obligation en contraignant les compagnies pétrolières à ajouter des carburants renouvelables, par exemple du biodiesel et de l'éthanol, au gazole et à l'essence qu'elles distribuent. Comme le taux d'incorporation va sans doute augmenter quelque peu au fil du temps, il est permis de penser que le carburant routier marginal utilisé pendant la période d'amortissement se composera normalement de 20 pour cent de biocarburant et de 80 pour cent d'essence ou de gazole. Les calculs ci-dessous se fondent sur l'hypothèse que les biocarburants réduiront les émissions de la source à la roue de 65 pour cent (soit $0.65 \times 0.2 = 0.13$). Il n'est pas tenu compte du fait que certaines voitures et certains cars ne consommeront que du biocarburant, parce que l'accent est mis sur l'effet marginal au niveau systémique.

Il est évidemment à craindre, dans une optique climatique, que la raréfaction des produits pétroliers pousse à long terme leur prix à un niveau qui incite à tirer du pétrole de sources non classiques telles que les sables et schistes bitumineux. L'Economist signale d'ailleurs qu'il continue à s'investir beaucoup dans les sables et schistes canadiens malgré les crises financières¹⁰.

Il est toutefois très peu probable que le pétrole non classique arrive à s'imposer dans les pays et les États fédérés qui obligent les compagnies pétrolières à réduire l'intensité globale de carbone de toute leur chaîne de production. Le rabaissment progressif des plafonds prévus par les systèmes d'échange de droits d'émission compliquera également l'accès de ces carburants au marché. Ils ne sont donc pas pris en compte dans le présent rapport.

14. COEFFICIENTS FUTURS D'ÉMISSION

Le Tableau 3 fait la synthèse des conclusions des précédents chapitres du rapport et chiffre les émissions directes et indirectes qui seront produites par les véhicules neufs en 2025.

Tableau 3. **Émissions de CO₂ produites par des véhicules neufs effectuant du transport interurbain en 2025 (en grammes par siège/kilomètre)**

Mode	Émissions
Voiture à moteur à combustion interne	18.3
Voiture électrique	21.2
Autocar de ligne	10.5
Train rapide (150 km/h)	9.5
Train à grande vitesse (280 km/h)	15.4
Avion court-courrier	93.8

Il est surprenant que la voiture classique émet moins que la voiture électrique, mais cela s'explique par le fait qu'elle consomme 20 pour cent de biocarburant. Les émissions monteraient à 21 grammes par siège/kilomètre en cas d'utilisation d'essence ou de gazole purs.

15. TAUX DE REMPLISSAGE

La comparaison des différents modes de transport doit tenir compte de l'inégalité de leurs taux de remplissage. A l'heure actuelle, les trains grandes lignes qui ne s'arrêtent pas ou pas souvent en cours de route circulent avec 45 à 70 pour cent en moyenne de leurs sièges occupés et les compagnies aériennes régulières semblent afficher des taux de remplissage de 70 pour cent. Pour ce qui est des trains à grande vitesse, Network Rail (2009) signale que le taux de remplissage de 12 services différents assurés dans quatre pays oscille entre 42 et 88 pour cent, la moyenne se situant donc au niveau de 64 pour cent. Les trains régionaux et les autocars de ligne qui s'arrêtent en beaucoup

d'endroits peinent à se remplir sur la totalité du trajet. Leur taux de remplissage excède rarement 50 pour cent (de Rus et Nash, 2007), mais Swebus, concurrent acharné des trains régionaux et rapides, fait quand même état d'un taux de 56 pour cent (2008) pour son service Stockholm-Göteborg.

Les stratégies sont toutefois en train d'évoluer. Les compagnies aériennes bon marché réalisent des taux de remplissage élevés en modulant leurs tarifs, tandis que les compagnies régulières et les opérateurs ferroviaires apprennent petit à petit à améliorer leur tarification en temps réel. Les calculs qui suivent posent en hypothèse qu'en 2025, le taux moyen de remplissage sera de 80 pour cent pour les avions moyen-courriers, 75 pour cent pour les trains à grande vitesse, 65 pour cent pour les trains grandes lignes classiques et 55 pour cent pour les autocars de ligne¹¹. Les trains grandes lignes classiques sont censés s'arrêter dans le même nombre de gares intermédiaires que les trains à grande vitesse et leur moindre taux de remplissage s'explique par le fait que les trains à grande vitesse attirent plus de voyageurs qui permettent, non seulement d'augmenter les fréquences (cf. ci-dessus), mais aussi de relever le nombre moyen de voyageurs embarqués.

L'inégalité des taux de remplissage des trains classiques (150 km/h) et des trains à grande vitesse (280 km/h) implique que ces derniers ne consomment que 41 pour cent d'énergie en plus par voyageur/kilomètre alors qu'ils en consomment 60 pour cent de plus par siège/kilomètre.

Dans beaucoup de pays, les cinq sièges d'une voiture particulière ne sont occupés que par 1.2 à 1.5 personne en moyenne. Le taux d'occupation est toutefois plus élevé sur les déplacements à longue distance que sur les déplacements locaux et autres migrations alternantes. Les collègues de bureau se regroupent dans une ou quelques voitures pour rejoindre un lieu de réunion éloigné, tandis que les familles préfèrent souvent la voiture au train ou à l'avion pour leurs déplacements de vacance. Les études de l'incidence de la mise en service de trains à grande vitesse sur l'usage de la voiture font osciller le taux moyen d'occupation des voitures entre 1.5 et 2.2 personnes (CCAP et CNT, 2006 ; Econ 2008a, ATOC, 2009). Le présent rapport pose donc en hypothèse que 2.0 personnes en moyenne voyagent ensemble en voiture pour effectuer des déplacements interurbains (taux d'occupation : 40 pour cent).

Le Tableau 4 chiffre, en tenant compte des taux de remplissage moyen, les émissions qui seront produites par des véhicules neufs effectuant des déplacements interurbains en 2025.

Tableau 4. **Émissions de CO₂ produites par des véhicules neufs effectuant du transport interurbain en 2025 (en grammes par siège/kilomètre)**

Mode	Émissions
Voiture à moteur à combustion interne	45.8
Voiture électrique	53.0
Autocar de ligne	19.1
Train rapide	14.6
Train à grande vitesse	20.6
Avion court-courrier	117.2

16. IMPACT DU TRANSFERT MODAL SUR LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Les décideurs du monde entier investissent des fonds publics dans des nouvelles infrastructures de transport en favorisant, s'ils visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre, les chemins de fer et la grande vitesse ferroviaire. Le basculement d'une partie du trafic routier de la voiture vers l'autocar réduirait également les émissions, sans toutefois requérir la construction de nouvelles infrastructures. C'est donc bien du rail qu'il s'agit. L'analyse de l'impact d'investissements réalisés dans le domaine ferroviaire sur les émissions de gaz à effet de serre doit tenir compte du fait que ces investissements peuvent :

- faire diminuer les émissions si du trafic aérien et routier migre vers le rail ;
- faire augmenter les émissions si les trains peuvent circuler à plus grande vitesse ;
- faire augmenter les émissions si l'offre de nouveaux services plus rapides génère du trafic induit ;
- libérer des capacités sur une ligne existante s'il y a construction d'une nouvelle ligne.

Cette possibilité de réduire les émissions en augmentant le trafic marchandises et le trafic voyageurs régional des lignes préexistantes sera abordée dans une partie suivante du rapport.

L'importance relative des trois premiers facteurs varie d'un cas à l'autre. Une ligne à grande vitesse qui remplace une ligne très inefficace sur laquelle la vitesse moyenne ne dépasse pas 80 km/h générera plus de trafic induit qu'une ligne qui complète ou remplace une ligne existante parcourable à 150 km/h.

La ligne à grande vitesse Madrid-Séville (471 kilomètres) a été empruntée par 5.6 millions de voyageurs en 2000, sept ans après sa mise en service. La part de marché du train est passée de 14 pour cent en 1991 à 54 pour cent tandis que l'avion revenait de 11 à 4 pour cent, la voiture de 60 à 34 pour cent et les autocars de 15 à 8 pour cent (Nelldal *et al.*, 2003). Comme le nombre total de déplacements a dans le même temps augmenté de 5 pour cent en moyenne par an, le nombre de déplacements effectués en avion, en voiture et en car a beaucoup moins diminué. Les chiffres donnent à penser que l'ouverture de la nouvelle ligne a généré un fort trafic induit, c'est-à-dire des déplacements qui n'auraient pas été effectués en l'absence de cette ligne. La grande vitesse et des tarifs peu élevés permettent à de nombreux voyageurs d'effectuer des déplacements qu'ils n'auraient pas envisagé de faire précédemment, par exemple pour rendre plus souvent visite à des amis, se rencontrer au lieu de se parler au téléphone ou assister à des matchs de football.

La ligne Madrid-Séville a divisé le temps de parcours par deux en le ramenant de 5 à 2.5 heures (UIC, 2008). Les investissements dans la grande vitesse ferroviaire ne donnent pas toujours de tels résultats. Les lignes à grande vitesse Stockholm-Göteborg (460 kilomètres) et Stockholm-Malmö (615 kilomètres) qui relieront entre elles les trois plus grandes villes du pays devraient réduire les temps de parcours de respectivement 27 et 44 pour cent (en le ramenant par exemple de 2 h 45 à

2 heures sur Stockholm-Göteborg). Une étude commanditée par le Gouvernement suédois (UOH, 2009) conclut néanmoins que l'investissement (construction des deux nouvelles lignes) aurait pour effet :

- d'augmenter le nombre de vkm du rail de 7.7 milliards ;
- de réduire le nombre de pkm de l'avion de 1.6 milliard ;
- de réduire le nombre de vkm de la voiture de 3.1 milliards ; et
- de réduire le nombre de vkm de l'autocar de 0.1 milliard.

Il ressort de ces chiffres que les transferts de trafic représenteront 4.8 milliards de vkm par an et que les lignes à grande vitesse généreront un nouveau trafic interurbain de 2.9 milliards de vkm représentant 38 pour cent de l'augmentation totale prévue du trafic voyageurs des chemins de fer. L'ampleur du trafic enlevé à la voiture pourrait cependant être remise en question, parce qu'il est permis de se demander pourquoi tant de gens se laisseraient tenter par la grande vitesse ferroviaire, alors que les trains qui circulent actuellement entre ces trois villes sont déjà nettement plus rapides que la voiture.

Dans une étude réalisée pour le Gouvernement norvégien, VWI (2007) estime que la construction d'une ligne à grande vitesse entre Oslo et Trondheim (464 kilomètres) aurait les effets chiffrés dans le Tableau 5. Il est intéressant de noter que le trafic transféré de la voiture vers le rail est ici minime et que la part du trafic induit est aussi moindre, bien que les gains de temps soient plus importants qu'en Suède.

Tableau 5. **Trafic transféré et induit par la construction d'une ligne à grande vitesse entre Oslo et Trondheim**

	Part du trafic total (%)
Transfert de l'avion vers le train	38
Transfert de la voiture vers le train	7
Transfert de l'autocar vers le train	6
Transfert total	51
Trafic induit	26
Augmentation totale du trafic du train	77
Trafic voyageurs préexistant	23
Trafic voyageurs total du train	100

CCAP et CNT (2006) s'attendent à ce que le trafic enlevé à la voiture, à l'avion et au train classique en vienne à représenter respectivement 47, 9 et 20 pour cent du trafic total de 12 futures lignes à grande vitesse américaines. L'importance du trafic transféré de la voiture s'explique sans doute par le fait que la voiture occupe une position dominante sur le marché des moyennes distances aux États-Unis et que le chemin de fer en est ici et là totalement absent.

Pour calculer l'impact du transfert modal sur les émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire d'estimer la part respective des voitures à moteur à combustion interne et des voitures électriques (tout électriques et hybrides rechargeables). Comme le présent rapport s'intéresse aux émissions produites par les voitures neuves en 2025, l'estimation doit se fonder sur une évaluation de ce que sera à cette date la répartition des ventes de véhicules neufs par type de moteur. Il sera donc supposé que les voitures classiques (y compris les hybrides non rechargeables), les électriques

rechargeables et les tout électriques représenteront alors respectivement 40, 40 et 20 pour cent du marché et que les hybrides rechargeables parcourront la moitié de leur kilométrage annuel en étant mues par de l'électricité tirée du réseau et ne pourront, étant donné qu'elles ne peuvent pas stocker beaucoup d'électricité à bord, parcourir qu'un dixième de leurs déplacements interurbains en mode électrique. Comme bon nombre de voitures à accumulateurs seront sans doute utilisées pour effectuer des déplacements locaux et régionaux plutôt qu'à longue distance, (certains ménages auront plus d'une voiture), il semble licite de penser que ces voitures interviendront pour moins de 20 pour cent dans la mobilité interurbaine. Le rapport se fonde sur l'hypothèse que le pourcentage se situera au niveau de 10 pour cent, ce qui implique que la part de l'électricité tirée du réseau ne montera qu'à 14 pour cent pour les voitures neuves et que les émissions moyennes s'élèveront à 46.8 grammes par voyageur/kilomètre.

Le Tableau 6 illustre un exemple fictif qui donne une idée de l'impact possible de nouvelles infrastructures ferroviaires sur les émissions de gaz à effet de serre. Il chiffre les émissions produites quelques années après l'inauguration d'une nouvelle ligne à grande vitesse parcourable à 280 km/h au lieu des 150 km/h réalisables sur une ligne existante, en partant de l'hypothèse que le trafic de la ligne à grande vitesse se compose à hauteur de 30 pour cent de transfuges des trains classiques, de 20 pour cent d'anciens passagers des avions, de 20 pour cent d'ex-automobilistes et de 5 pour cent d'anciens usagers des autocars, les 25 pour cent restants se constituant de trafic induit. Le Tableau donne les chiffres obtenus par million de déplacements effectués entre des villes éloignées de 500 kilomètres.

Tableau 6. Incidence de l'ouverture d'une ligne à grande vitesse de 500 kilomètres remplaçant une ligne existante sur les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre en tonnes d'équivalent CO₂ par million de déplacements

	Part du trafic total (%)	Impact sur les émissions (tonnes CO₂equiv)
Transfert de l'avion vers le TGV	20	-9 660
Transfert de la voiture vers le TGV	20	-2 620
Transfert du car vers le TGV	5	+38
Transfert total	45	
Trafic induit généré par le TGV	25	+2 575
Augmentation totale du trafic ferroviaire	70	
Trafic voyageurs des trains préexistants	30	+900
Trafic voyageurs total des trains	100	-8 767

Une réduction d'environ 8 000 tonnes par 500 voyages n'a rien d'un progrès notable. L'atténuation du changement climatique n'aurait même pas grand chose à y gagner, si le nombre total de déplacements annuels passait à 10 ou 20 millions.

Les chiffres rassemblés dans le Tableau 6 ont été calculés sans tenir compte du fait que les infrastructures ferroviaires de certains pays peuvent accueillir des trains plus hauts, plus larges ou plus longs que ceux qui circulent habituellement dans d'autres parties du monde. Au Japon et en Scandinavie, l'écartement entre les voies est suffisant pour autoriser le passage de voitures de grande

largeur à la différence de ce qui se passe en Grande-Bretagne et sur le reste du continent européen. La réduction de 15 ou 20 pour cent de l'énergie consommée par les trains à grande vitesse ne modifierait toutefois pas grand-chose à la situation.

17. ÉVALUATION DU CO₂

L'incidence positive d'investissements en mesures de promotion du transfert modal sur le changement climatique dépend de la valeur attribuée au carbone.

Le prix du CO₂ trouvera une validité (plus ou moins) mondiale, si les systèmes de plafonnement et d'échange deviennent un moyen privilégié de limitation des émissions de gaz à effet de serre et sont reliés entre eux. La valeur économique d'une réduction nette entraînée par des investissements en mesures de promotion du transfert modal dépend donc du prix futur du carbone. Son prix à long terme pourrait, en fonction de la rigueur des plafonds et du progrès technique, se situer quelque part entre 30 et 80 USD la tonne de CO₂, mais ne devrait vraisemblablement pas dépasser de beaucoup 40 à 50 USD la tonne en 2025. La réduction des émissions dans les proportions indiquées dans le Tableau 6 générerait donc un avantage socioéconomique qui ne devrait pas excéder 7.0 à 8.8 millions USD sur un trafic annuel total de 20 millions de déplacements.

18. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Une modification de 10 pour cent, en plus ou en moins, de certains des principaux paramètres donne des résultats qui ne diffèrent pas assez de ceux des calculs déjà effectués pour justifier une révision des conclusions. Même la combinaison de plusieurs hypothèses optimistes favorables à la grande vitesse ferroviaire n'y changerait pas grand-chose. La réduction de moitié de l'impact marginal de la consommation d'électricité sur le climat et le relèvement à 30 pour cent du taux de transfert du trafic aérien (avec réduction concomitante de la part de la voiture à 10 pour cent) ne pourraient ensemble pas ramener les émissions à moins de 16 167 tonnes de CO₂ par million de déplacements. Il est insensé de prévoir un taux de transfert du trafic aérien très élevé, parce qu'il ne sera jamais possible d'enlever à l'avion plus de 100 pour cent de son trafic et que la plupart des compagnies aériennes seront capables de conserver 20 à 30 pour cent de leurs clients. Un trafic induit moins important ferait diminuer quelque peu les émissions, mais ferait aussi disparaître une part importante du marché de la grande vitesse ferroviaire.

La mise entre parenthèses de l'impact de la consommation d'électricité sur le climat (comme le souhaite l'administration suédoise des chemins de fer) ne réduirait pas les émissions par million de déplacements de plus de 16 000 tonnes, si l'avion perd 20 pour cent de son trafic, ou 20 000 tonnes s'il

en perd 30 pour cent. La multiplication du chiffre le plus élevé par 10 ou par 20 pour chiffrer la contribution annuelle de la ligne à grande vitesse ne permet pas d'arriver à plus de 0.2 à 0.4 million de tonnes par an.

Le calcul des émissions année par année sur toute la durée d'amortissement de la nouvelle infrastructure et l'actualisation du coût pourraient donner un résultat différent, surtout si le taux d'actualisation est élevé. Les émissions marginales de CO₂ générées par la production d'électricité seront sans doute plus importantes à court terme, mais le prix du carbone sera en revanche plus bas. L'attribution d'un prix d'équilibre au carbone pourrait plaider en faveur d'un taux d'actualisation assez élevé, parce qu'il faut absolument commencer très rapidement à réduire les émissions pour prévenir un réchauffement excessif de la terre. Les avantages environnementaux de la grande vitesse ferroviaire sont, dans de telles conditions, moindres que dans l'exemple évoqué ci-dessus.

Les calculs portent sur les émissions du réservoir à la roue ou de la caténaire à la roue, avec addition des émissions générées par la production d'électricité (et en faisant abstraction des émissions produites par l'extraction du charbon et du gaz et des pertes enregistrées sur le réseau). La prise en compte des émissions de la source à la roue n'aurait pas donné des résultats très différents, même si les émissions de la source au réservoir/de la source à la caténaire étaient deux fois plus importantes pour les carburants que pour l'électricité.

L'impact de la construction d'une nouvelle ligne de chemin de fer sur les émissions à court terme est un paramètre important dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs ci-dessus. La construction d'une nouvelle ligne à grande vitesse peut entraîner l'émission de plusieurs millions de tonnes d'équivalent CO₂ (Norges Naturvernforbund, 2008, et Network Rail, 2009) qui ont indéniablement un impact à court terme sur la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, même si elles sont contrebalancées par une réduction de l'ensemble des émissions à long terme. Les investissements dans la grande vitesse ferroviaire risquent donc manifestement d'ajouter aux difficultés que soulève le maintien de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche la température moyenne globale de dépasser de plus de 2 degrés Celsius son niveau d'avant l'industrialisation. Il pourrait, pour le bien du climat, être préférable de moderniser des lignes existantes et de convaincre les gens d'utiliser des moyens modernes de télécommunication au lieu d'investir sans compter pour les faire voyager davantage.

L'auteur du présent rapport a fait de son mieux pour expliciter dans le détail toutes les hypothèses sur lesquelles ses calculs et ses conclusions reposent, laissant ainsi le lecteur libre de modifier ces hypothèses comme il le croit judicieux et d'effectuer ses propres calculs.

19. LIBÉRATION DE CAPACITÉS POUR LES TRANSPORTS DE MARCHANDISES – CAS DE LA SUÈDE

Une ligne à grande vitesse entièrement nouvelle attirera à elle du trafic venant des lignes préexistantes dont les capacités ainsi libérées pourront servir à d'autres types de trains, pour autant évidemment que la demande existe. La situation est souvent complexe et la solution optimale peut varier considérablement selon les circonstances. Le cas de la Suède analysé ci-dessous ne l'est qu'à titre d'exemple.

En Suède, la libération de capacités affectables au transport de marchandises est un des principaux arguments avancés à l'appui de la construction de lignes à grande vitesse entre Stockholm et Göteborg, d'une part, et Malmö, d'autre part. Il est toutefois judicieux, avant d'investir dans ces nouvelles lignes à grande vitesse, de se demander si les problèmes de capacité du transport de marchandises par chemin de fer peuvent être résolus par d'autres moyens moins onéreux. L'amélioration des systèmes de signalisation et l'aménagement de voies d'évitement peuvent augmenter très nettement la capacité du réseau existant (Nilsson et Pydokke, 2009).

La congestion de la ligne Stockholm-Göteborg est due en partie au transport de conteneurs entre le port de Göteborg et l'intérieur du pays. La plus grande partie des marchandises conteneurisées transportées à destination et en provenance de l'agglomération de Stockholm passent par Göteborg bien qu'elles viennent de pays lointains, de Chine par exemple, ou y soient expédiées. Le port de Stockholm investit actuellement dans la construction d'un nouveau terminal à conteneurs, proche de la mer, pour conquérir ce marché. Hutchinson Port Holdings va gérer ce terminal en même temps que celui de Rotterdam.

Une grande partie des marchandises qui entrent en Suède ou en sortent pourraient aussi être transportées sur des courtes distances par mer. L'amélioration à grands frais des infrastructures ferroviaires suédoises n'a guère de sens, tant que les trains de marchandises ne peuvent pas traverser le Danemark pour rejoindre une destination sur le continent européen. La capacité ferroviaire de traversée du Sund et du Fehmarn Belt restera limitée même après l'ouverture du pont sur le Fehmarn Belt (Rödby-Puttgarten) en 2018.

Le transport maritime à courte distance est toutefois handicapé par le fait que l'État taxe tous les navires qui touchent des ports suédois et que les taxes couvrent, non seulement les coûts marginaux à court terme, mais aussi les coûts fixes des infrastructures. Les trains de marchandises acquittent en revanche les redevances d'accès aux infrastructures les plus basses d'Europe, des redevances qui ne couvrent même pas les coûts marginaux à court terme et, *a fortiori*, les coûts de renforcement des infrastructures. La Suède pourrait mettre tous les modes sur un pied d'égalité en leur appliquant les mêmes règles de partage des responsabilités, ce qui implique un relèvement des redevances d'accès dues par les trains et une taxation des poids lourds aux kilomètres parcourus, comme plusieurs États membres de l'Union Européenne l'ont déjà fait ou vont le faire.

L'exemple de la Suède n'est pas transposable à d'autres pays ou régions qui ne se trouvent pas dans des situations identiques. D'autres solutions, telles par exemple qu'une utilisation plus intensive des voies navigables et/ou des oléoducs, pourraient être plus indiquées ailleurs dans le monde. Les mégacamions (*gigaliners*) électriques alimentés par le réseau pourraient s'envisager là où les autoroutes ne sont pas engorgées. L'électrification d'une autoroute ne devrait pas être excessivement coûteuse ou générer de fortes émissions de CO₂.

20. CONCLUSIONS

Il n'y a aucune raison écologique d'interdire d'investir dans la grande vitesse ferroviaire si la réduction des émissions produites par le trafic contrebalance les émissions produites pendant la construction. Les chemins de fer prétendent cependant souvent que les investissements en infrastructures ferroviaires sont porteurs d'avantages environnementaux importants (Banverket, 2008 ; UNIFE, 2008 ; UIC, 2008), mais des études indépendantes constatent que ces avantages ne sont pas si importants que ça (de Rus, 2008 ; WSP et KTH Järnvägsgruppen, 2008 ; Nilsson et Pydokke, 2009). Les conclusions du présent rapport vont dans ce dernier sens.

Les investissements dans la grande vitesse ferroviaire ne sont pas de nature à tempérer de beaucoup le changement climatique et les investissements dans les trains rapides classiques pourraient être nettement plus profitables. Il serait peut-être temps que les ONG actives dans le domaine de l'environnement changent leur fusil d'épaule et cessent de réclamer l'engloutissement de sommes énormes dans la grande vitesse ferroviaire tout en exigeant que la vitesse des véhicules routiers soit plus strictement limitée, que les avions soient conçus pour voler moins vite et que les armateurs fassent naviguer leurs navires plus lentement.

La construction de lignes à grande vitesse coûte très cher, de 9 à 40 millions euros par kilomètres d'après de Rus (2008) et de 12 à 30 millions euros par kilomètre d'après l'UIC (2008). De Rus chiffre le coût moyen à 18 millions euros. De tels coûts semblent bien ne pouvoir être couverts que par des volumes de trafic réellement énormes. Les principaux avantages de la grande vitesse ferroviaire sont à rechercher du côté des gains de temps, du renforcement des capacités et du trafic induit. D'autres avantages macroéconomiques pourraient aussi avoir de l'importance, mais ils sont difficiles à estimer. La grande vitesse ferroviaire a le plus de chances de s'imposer là où les volumes de trafic sont élevés (de Rus et Nash, 2007).

Une nouvelle ligne à grande vitesse ne peut pas se justifier, sauf conditions exceptionnelles (conjonction de coûts de construction peu élevés et de gains de temps considérables), si son trafic est inférieur à 6 millions de voyageurs par an pendant sa première année d'exploitation. Si les coûts de construction et les gains de temps se situent à un niveau normal, le trafic devra probablement atteindre les 9 millions de voyageurs par an (Commission Européenne, 2008).

NOTES

1. Les trains à grande vitesse peuvent toutefois s'accommoder de pentes un peu plus accusées que les trains classiques.
2. Un rayon de courbure de 2.5 kilomètres suffit pour des vitesses égales ou inférieures à 200 km/h (l'idéal se situe au niveau de 3.5 kilomètres).
3. Evert Andersson, Institut royal de technologie, Stockholm, communication personnelle et Network Rail (2009), p. 9.
4. <http://sasgroup.net> (Airbus A321-200, A319-100, Boeing737-400/500/600/700/800, and MD90).
5. <http://sasgroup.net> (Airbus A321-200 et A319-100, Boeing 737-400/500/600/700/800 et MD90). *Airlines present climate change proposals to heads of government*. Communiqué de presse du 22 septembre 2009.
6. <http://www.megabus.com>
7. Edward Jobson, AB Volvo, communication personnelle.
8. 2.5 correspond à une efficacité électrique de 40 pour cent normale pour les centrales à condensation au charbon.
9. Loi américaine de 2009 sur l'énergie propre et la sécurité.
10. The Economist, 5 septembre 2009.
11. RSSB le fixe à 60 pour cent pour les services de point à point.

BIBLIOGRAPHIE

- ATOC (2009), *Energy Consumption and CO₂ Impacts of High Speed Rail: ATOC analysis for Greengauge 21*. The Association of Train Operating Companies, Londres (by Richard Davies and Leigh Thompson).
- Banverket (2008), *Svenska Høghastighetsbanor*. Banverket Rapport 2008-005-30, Borlänge, Suède. (Administration nationale des chemins de fer)
- CCAP and CNT (2006), *High Speed Rail and Greenhouse Gas Emissions in the U.S.*. Center for Clean Air Policy, and Center for Neighborhood Technology.
- CCC (2008). *Building a low-carbon economy – the UK's contribution to tackling climate change*. The Committee on Climate Change, Londres.
- Commission Européenne, Direction générale de la politique régionale (2008), *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*.
- de Rus, G. et Nash C. (2007), *In What Circumstances is Investment in High Speed Rail Worthwhile?* Institute of Transport Studies, University of Leeds. Working Paper 590.
- de Rus, G. (2008), *The Economic Effects of High Speed Rail Investment*. Université de Las Palmas et Centre conjoint de recherche OCDE.
- ECON (2008a), *Klimaeffekter av høghastighetstog*. Rapport 2008-101, Oslo.
- ECON (2008b), *Nytte-kostnadsanalyse av høghastighetstog i Norge*. Rapport 2008-154, Oslo.
- Entec (2008), *Evaluation of the Member States' emission inventories 2004-2006 for LCPs under the LCP Directive (2001/80EC)*. Rapport final établi par Entec UK Ltd. Consultancy pour la Commission Européenne, DG Environnement.
- GIEC (1999), *L'aviation et l'atmosphère planétaire*, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge University Press.
- Hacker, F., Harthan, R., Matthes, F. et Zimmer, W. (2009), *Environmental impacts and impact on the electricity market of large scale introduction of electric cars in Europe. Critical Review of Literature*. ETC/ACC Technical Paper, European Topic Centre on Air and Climate Change.
- Kemp, R. (2004), *Transport energy consumption. A discussion paper*. Lancaster University, 10 septembre 2004.

- King, J. (2007), *The King Review of low-carbon cars. Part 1: The potential for CO2 reduction*. Londres.
- Lukaszewicz, P. et Andersson, E. (2006), *Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains*. Report KTH/AVE 2006:46, KTH Rail Group, Institut Royal de Technologie, Stockholm.
- Lukaszewicz, P. et Andersson, E. (2009), *Green Train energy consumption. Estimations on high-speed rail operations*, KTH Rail Group, Institut Royal de Technologie, Stockholm.
- Ministère des Transports (2007), *Delivering a Sustainable Railway*. Ministère des transports, Londres.
- Nelldal, B.L., Troche, G. et Jansson, K. (2003), *Europakorridoren. Ett bredband för fysiska transporter*. KTH Rail Group, Institut Royal de Technologie, Stockholm
- Network Rail (2009), *Comparing environmental impact of conventional and high speed rail*. Londres.
- Nilsson, J.E. et Pyddoke, R. (2009), *Höghastighetsjärnvägar – ett klimatpolitiskt stickspår*. Rapport till Expertgruppen för miljöstudier 2009:3. Ministère des Finances, Stockholm.
- Norges Naturvernforbund (2008), *Energi- og klimakonsekvenser av modern transportsystemer. Effekter ved bygging av høyhastighetsbaner i Norge*. Rapport 3/2008.
- RSSB (2007), *Traction energy metrics*. Rail Safety & Standard Board, Londres (by Roger Kemp).
- UIC (2008a), *High speed rail. Fast track to sustainable mobility*. Union Internationale des Chemins de fer, Paris.
- UIC (2008b), *Process, Power, people. Energy Efficiency for Railway Managers*. Union Internationale des Chemins de fer, Paris.
- UIC and CER (2008), *Rail Transport and Environment. Facts & Figures*, Paris et Bruxelles, novembre.
- UNIFE (2008), *More rail = Less CO₂*. The European Rail Industry.
- UOH (2009), *Höghastighetsbanor – ett samhällsbygge för stärkt utveckling och konkurrenskraft*. Betänkande av Utredningen om höghastighetsbanor. SOU 2009:74 (Ministère des Entreprises, Stockholm)
- van Essen, H., Bello, O., Dings J. et van den Brink R. (2003), *To shift or not to shift, that's the question*. CE Delft and RIVM.
- WVI (2007), *Feasibility Study Concerning High Speed Rail Lines in Norway*, Report Phase 2. Verkehrswissenschaftliches Institut, Stuttgart
- WSP and KTH Järnvägsgruppen (2008), *Höghastighetståg – affärsmässighet och samhällsnytta*. Slutrapport 2008. WSP Analys & Strategi, and KTH Järnvägsgruppen, Stockholm.

WWF (2009), *Auswirkungen von Elektroautos auf den Kraftwerkspark und die CO₂-Emissionen in Deutschland*, Fonds mondial pour la nature, Francfort.

Zängl, W. (1993), *Die Geisterbahn. Das Dilemma der Hochgeschwindigkeitzüge*. Raben Verlag, München.