



Conseil économique et social

Distr. générale
9 avril 2010
Français
Original: anglais

Commission économique pour l'Europe

Comité des transports intérieurs

Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules

Cent cinquante et unième session

Genève, 22-25 juin 2010

Point 8.5 de l'ordre du jour provisoire

Questions diverses – Table ronde sur les changements climatiques et les transports

Organisation d'une table ronde sur les changements climatiques et les transports en juin 2010 – Tour d'horizon de la documentation existante sur les transports intérieurs et les changements climatiques

Note du secrétariat*

Le texte reproduit ci-après a été établi par le secrétariat comme document de travail pour la séance de réflexion tenue par le Forum mondial de l'harmonisation des Règlements concernant les véhicules (WP.29) pendant la session de novembre 2009 afin d'organiser une table ronde sur les changements climatiques et les transports. Il a été examiné par le Forum mondial à sa session de mars 2010, lequel a décidé de le présenter en tant que document d'information pour la table ronde (ECE/TRANS/WP.29/1083, par. 74).

* Conformément au programme de travail du Comité des transports intérieurs pour la période 2006-2010 (ECE/TRANS/166/Add.1, activité 02.4), le Forum mondial élaborera, harmonisera et actualisera des Règlements afin d'améliorer les caractéristiques fonctionnelles des véhicules. Le présent document est soumis en vertu de ce mandat.

I. Résumé

1. Le présent document fait un tour d'horizon des publications scientifiques récentes sur les transports intérieurs et les changements climatiques. Il s'articule autour des sujets suivants: a) la situation actuelle et les tendances à venir; b) le rôle des transports dans les politiques d'atténuation (solutions technologiques et changements de mode de vie); et c) la vulnérabilité de l'infrastructure de transport aux dommages causés par les changements climatiques (impacts et adaptation possible). Il fait état des principaux résultats et identifie les lacunes éventuelles des recherches réalisées dans ce domaine. Mots clefs: changements climatiques, transports intérieurs, analyse bibliographique, atténuation, solutions technologiques, choix de carburants, analyse du cycle de vie, adaptation, changements de mode de vie.

II. Introduction

2. Le présent document résume la littérature scientifique portant sur les transports intérieurs et les changements climatiques. Il résulte d'un examen des publications les plus récentes dans ce domaine de recherche. Nos sources de documentation incluent les principales revues scientifiques qui sont publiées dans des sphères de recherche pertinentes. Nous accordons une attention particulière aux modes de transport intérieur, que nous définissons comme étant les transports terrestre et fluvial (voies ferrées, routes, voies navigables intérieures et oléoducs). Nous n'aborderons par conséquent pas en détail les questions liées aux transports maritime et aérien.

3. Une analyse bibliographique de la littérature scientifique sur les transports et les changements climatiques a déjà été réalisée par Chapman (2007). Elle reprend de nombreuses références déjà fournies par Hensher et Button (2003). Chapman (2007) articule son étude autour des modes de transport (transport automobile, transport routier de marchandises, transport aérien, transport maritime, transport par bus, marche et cyclisme) et aborde principalement la question du point de vue de l'atténuation. S'inscrivant dans le prolongement de cette étude, Koetze et Rietveld (2009) ont entrepris un examen approfondi des publications empiriques sur les impacts des changements climatiques sur le secteur des transports. Dans le présent document, nous venons compléter ces examens antérieurs en présentant et en analysant les publications pertinentes les plus récentes qui mettent l'accent sur les modes de transport intérieur.

4. L'exploration des liens entre les transports intérieurs et les changements climatiques nous permet d'aborder les thèmes suivants: i) la situation actuelle; ii) le rôle des transports dans les politiques d'atténuation (solutions technologiques et changements de mode de vie); et iii) la vulnérabilité de l'infrastructure de transport aux dommages causés par les changements climatiques (impacts et adaptation possible).

III. Situation actuelle et tendances à venir

A. Analyse bibliographique¹

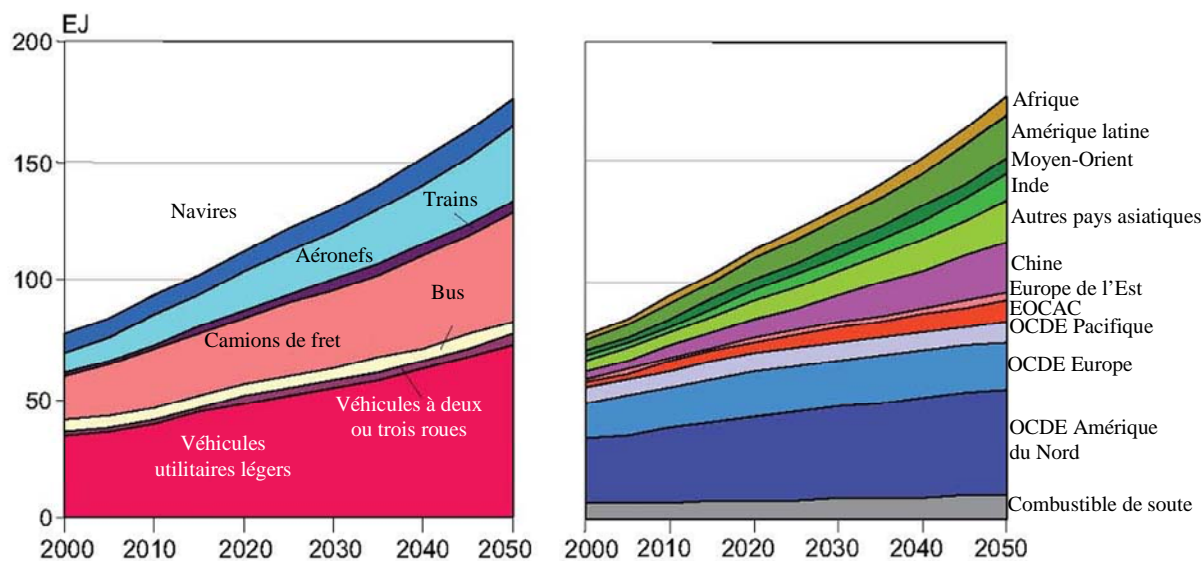
5. Les changements climatiques ont été largement mis sur le compte du secteur des transports. On estime ainsi que celui-ci est actuellement responsable de 23 à 25 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) liés à l'énergie (Agence internationale de l'énergie (AIE) (2009)), ce chiffre étant imputable, dans une proportion de 65 %, au transport routier et, dans une proportion de 23 %, au transport ferroviaire, au transport aérien intérieur et au transport par voies navigables (Chapman (2007)). Si les tendances actuelles se maintiennent, la consommation énergétique et les émissions de CO₂ liées aux transports devraient augmenter de près de 50 % d'ici à 2030 et de plus de 80 % d'ici à 2050.

6. Compte tenu des faits et des projections susmentionnés, il n'est pas surprenant que la question des transports et des changements climatiques ait déjà été longuement abordée dans plusieurs rapports et ait fait l'objet d'examen collégiaux approfondis dans la littérature scientifique.

7. Citons premièrement le chapitre sur les transports et l'infrastructure de transport (Ribeiro *et al.* (2007)) de la contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui présente de manière détaillée la consommation d'énergie actuelle et future en fonction des divers modes de transport (voir la figure 1) et des tendances qui se dessinent pour ce qui est du taux de motorisation.

¹ Cette analyse bibliographique a été effectuée conjointement, en novembre 2009, par Alain Haurie (Directeur d'Ordecys et professeur (honoraire) de recherche opérationnelle, Section des hautes études commerciales (HEC) – Gestion, Université de Genève), André Sceia (Laboratoire de recherches en économie et management de l'environnement, École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et Division des transports de la CEE) et Julien Thénier (Ordecys, Place de l'Étrier 4, CH-1224 Chêne-Bougeries (Suisse))

Figure 1
**Projections sur la consommation énergétique liée aux transports,
 par région et par mode de transport**



Source: Ribeiro *et al.* (2007).

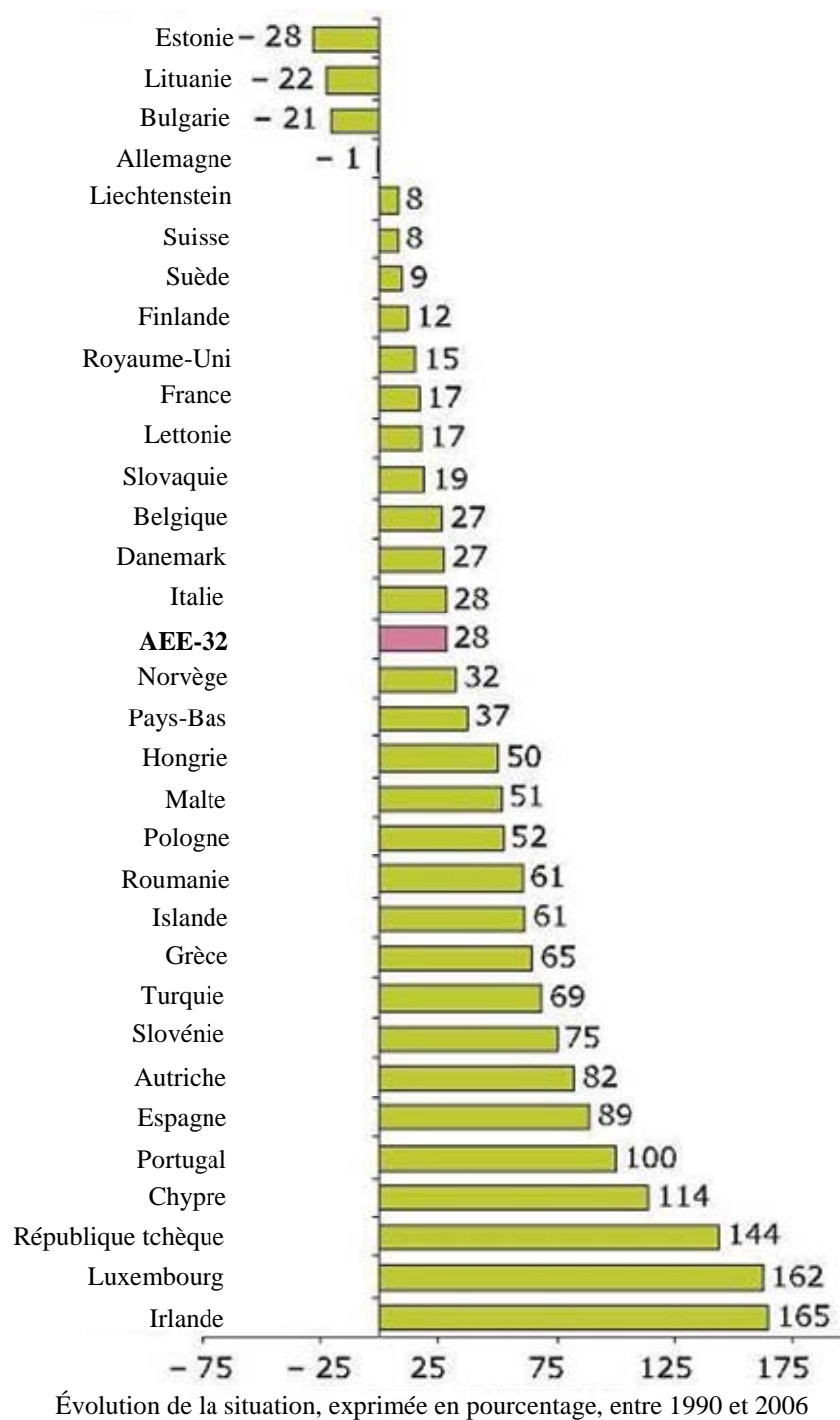
8. Deuxièmement, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ne cesse de publier une multitude de rapports intéressants et de recueillir une vaste gamme de données pertinentes. Ainsi, dans ses publications récentes, l'AIE (2009) examine la possibilité de privilégier encore davantage les modes de transport à haut rendement énergétique et de réduire la croissance des déplacements, d'améliorer le rendement énergétique des véhicules de presque 50 % grâce à des technologies novatrices et économiquement avantageuses et de se tourner vers l'électricité, l'hydrogène et les biocarburants avancés pour bâtir un avenir plus sécuritaire et plus durable à cet égard.

9. Troisièmement, l'Agence européenne pour l'environnement procède chaque année à un vaste examen sur les transports et l'environnement. Le rapport le plus récent (Agence européenne pour l'environnement (2009)) dresse un bilan plutôt sombre des impacts environnementaux et traite des transports et de la façon dont ils ont récemment influé sur les impacts environnementaux du secteur européen des transports.

10. Enfin, Stern (2006), à l'annexe 7 de son étude, présente également la situation actuelle et fait des projections dans l'hypothèse où les tendances observées se maintiennent concernant les émissions de GES, sur la base de sources similaires à celles ayant servi au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC (voir la figure 2).

Figure 2

Tendances des émissions de GES imputables au secteur des transports, par pays, entre 1990 et 2006



Source: Agence européenne pour l'environnement (2009).

11. Les offices nationaux de statistique, ainsi qu'Eurostat dans le cas de l'Union européenne, fournissent également des informations importantes concernant les statistiques sur les transports intérieurs. Les récentes tendances dont fait état Noreland (2009) sont

absolument capitales pour comprendre l'augmentation constante de la part des émissions qui est imputable aux transports intérieurs. Ce rapport souligne en effet que, en 2007, le transport routier de marchandises des 27 pays de l'Union européenne, exprimé en tonne-kilomètre (tkm), a enregistré une hausse de 27 % par rapport à 2000. La part du transport routier dans le transport intérieur total de marchandises (routes, voies ferrées et voies navigables intérieures) a légèrement progressé au fil des ans, pour atteindre actuellement 76 %. En 2006, les voitures particulières représentaient 83 % du transport intérieur de voyageurs (voitures particulières, bus et autocars, trains), cette part étant exprimée en voyageur-kilomètre (vkm). De futures publications pourraient confirmer que le récent ralentissement de l'activité économique a entraîné une réduction des activités de transport.

12. La littérature avalisée par des spécialistes regroupe également plusieurs articles intéressants, publiés récemment, qui viennent bien compléter les informations figurant dans des rapports majeurs. Ces articles portent en règle générale sur des aspects plus spécifiques des transports et des changements climatiques.

13. Les divers rapports analysés considèrent systématiquement que le taux de motorisation constitue l'un des principaux défis posés par le secteur des transports. Les tendances observées à cet égard dans certains pays en développement sont effectivement très frappantes. Han et Hayashi (2008) se penchent aussi sur l'augmentation potentielle du parc automobile dans les 31 provinces chinoises, compte tenu de la situation socioéconomique actuelle et de son impact probable sur la pollution atmosphérique (notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM), les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO₂)) jusqu'en 2020. Leurs résultats indiquent que le nombre total de voitures particulières et le volume des rejets de polluants connexes monteront en flèche pour atteindre à brève échéance des niveaux beaucoup plus élevés si les récentes tendances comportementales et les considérations techniques actuelles concernant l'utilisation des voitures particulières persistent. Malgré l'introduction de contrôles plus rigoureux pour l'achat d'une voiture particulière et les rejets de polluants, la Chine subira des pressions beaucoup plus fortes pour réduire ces émissions.

14. Creutzig et He (2009) analysent un large éventail des externalités des déplacements effectués par voiture particulière (par exemple l'encombrement des routes), limitant leur étude à la ville de Beijing. Ils démontrent que les coûts sociaux engendrés par le transport motorisé équivalent à environ 7,5 à 15 % du produit intérieur brut (PIB) de la ville tout en soulignant que les coûts liés aux changements climatiques demeurent incertains. Ils indiquent néanmoins qu'un impôt routier pourrait non seulement régler les problèmes de circulation mais aussi avoir des effets positifs sur l'environnement.

15. Concernant l'aspect politique de la croissance du transport en Chine, Hu *et al.* (2009) font un tour d'horizon des initiatives lancées en matière d'approvisionnement et de consommation énergétiques ainsi que des défis que pose un développement durable du transport routier en Chine. Après avoir mis en évidence les tendances observées dans ce pays entre 2000 et 2007, à savoir des augmentations de 156 % du parc de véhicules automobiles, de 51 % du volume de transport de voyageurs et de 65 % du volume de transport de marchandises, les auteurs présentent une multitude d'initiatives que le Gouvernement chinois a prises pour contrôler la croissance et préciser certaines questions liées notamment aux normes prévoyant de faibles émissions et aux coûts relatifs plus élevés des transports publics. Ils concluent en conseillant au Gouvernement de renforcer les technologies visant à réduire la consommation de carburant, de promouvoir la présence sur le marché de véhicules à haut rendement énergétique ou d'accorder la priorité aux transports publics dans les mégapoles, mais aussi de favoriser la commercialisation à grande échelle de carburants de remplacement dérivés du charbon, solution qui ne pourrait

peut-être pas résoudre les problèmes climatiques si elle n'est pas associée à des technologies de captage et de stockage du carbone.

16. Dans les pays développés, on considère que les changements de comportement ne sauraient se faire sans la sensibilisation du public aux problèmes climatiques. Dans ce contexte et sur la base d'un questionnaire distribué dans la région métropolitaine de Sacramento, en Californie, Flamm (2009) évalue les effets des connaissances et des comportements environnementaux sur le nombre et le type de véhicules que possède chaque foyer, la distance parcourue chaque année avec chaque véhicule et la consommation de carburant. Fait intéressant, cet auteur constate tout d'abord que les connaissances et les comportements environnementaux sont fortement liés (les répondants ayant indiqué que la protection de l'environnement leur tenait à cœur connaissent mieux les impacts environnementaux qu'entraînent la possession et l'utilisation d'un véhicule). Il constate aussi que les connaissances environnementales sont étroitement liées à la consommation moyenne de carburant des voitures particulières et que les ménages où les répondants connaissent mieux les impacts environnementaux inhérents à la possession et à l'utilisation d'un véhicule possèdent, en règle générale, des véhicules ayant un meilleur rendement énergétique. L'auteur souligne également que les connaissances environnementales ne vont pas de pair avec la réduction du nombre de véhicules, de la distance parcourue ni de la consommation de carburant. Ce constat montre qu'il existe un écart entre la sensibilisation au problème des changements climatiques et les mesures prises concrètement, ce qui constitue un motif supplémentaire de recourir à un instrument économique comme une taxe sur le CO₂.

17. Chen et Zhang (2009) se penchent quant à eux sur les technologies adoptées entre 1985 et 2002 par l'industrie automobile américaine pour améliorer le rendement énergétique de ses produits ainsi que sur les incidences de ces technologies sur l'environnement. Pour procéder à cette analyse, ils ont établi une estimation de l'équilibre approprié entre le poids et le rendement énergétique. Les auteurs en arrivent à la conclusion que la frontière technologique de l'industrie automobile américaine n'avait guère progressé pendant une période prolongée, soit dans les années 80 et 90, ce qui indiquait que de nouvelles technologies peu gourmandes en carburant n'avaient pas été systématiquement adoptées. Alors que l'entreprise disposant des moins grandes capacités à cet égard avait réussi à combler partiellement le fossé technologique, la frontière technologique des deux principaux fabricants avait montré certains signes de régression au début des années 90 et n'avait été repoussée de manière significative que vers la fin des années 90. L'industrie a peut-être ainsi perdu une occasion de réduire les impacts économiques et environnementaux. Ce type d'étude fournit de solides arguments en faveur de la mise en œuvre de réglementations en matière de rendement énergétique.

18. La contribution du secteur des transports au problème des changements climatiques est souvent prise en compte indépendamment de celle des autres secteurs économiques. O'Donnell *et al.* (2009) présentent une étude de cas analysant le cycle de vie de la contribution des transports aux émissions de GES dans l'ensemble des processus nécessaires à la production du blé en grains aux États-Unis. Cette étude se termine sur une conclusion intéressante, à savoir que compte tenu de la contribution du piégeage à l'empreinte GES de la chaîne logistique, les efforts accomplis pour que ces chaînes respectent l'environnement devraient prendre en considération les changements susceptibles d'être apportés au niveau du transport ainsi que ceux qui résulteront, sur le plan des émissions engendrées par la production, du fait que les changements apportés pourraient entraîner une modification du lieu de production.

19. Dans le même ordre d'idées, Liska et Cassman (2008) proposent que les méthodes fondées sur le cycle de vie, les critères métrologiques et les outils utilisés pour évaluer les systèmes de biocarburant en fonction des résultats de la production et de la transformation

des matières premières en biocarburant soient harmonisés à l'échelle régionale ou nationale et que le degré net d'atténuation des émissions de GES de chaque système de production de biocarburant soit établi de façon à être conforme aux règlements sur l'intensité des GES et aux mécanismes d'échange de droits d'émission de GES qui seront adoptés ultérieurement.

B. Analyse et lacunes éventuelles des recherches répertoriées

20. Les données statistiques et les études effectuées sur l'évolution des transports intérieurs constituent les principales sources d'information pour analyser le rôle de ceux-ci dans le problème des changements climatiques ainsi que la cause profonde de ces derniers. Les rapports de divers instituts et organismes nationaux et internationaux contiennent beaucoup d'informations à cet égard.

21. Bon nombre de recherches sont actuellement axées sur des pays en développement comme la Chine (par exemple Han et Hayashi (2008), Creutzig et He (2009), Hu *et al.* (2009)), où les émissions de GES générées par les transports intérieurs augmentent à un rythme extrêmement élevé et s'ajoutent à d'autres externalités comme les embouteillages ou la pollution atmosphérique locale.

22. S'agissant des pays développés, nous avons examiné deux documents analysant les comportements des consommateurs et des producteurs (Flamm (2009) ainsi que Chen et Zhang (2009)). Il est intéressant de noter qu'aucune étude ayant fait l'objet d'un examen collégial ne semble avoir été publiée concernant l'impact de la crise économique actuelle sur la réduction des émissions provenant des transports intérieurs, probablement parce qu'aucune statistique pertinente n'est encore disponible.

23. Les analyses du cycle de vie comme celles effectuées par O'Donnell *et al.* (2009) ainsi que par Liska et Cassman (2008) s'avèrent extrêmement utiles pour étudier le problème climatique parce qu'elles reposent sur une approche intersectorielle. La prochaine section aborde aussi cette question sous l'angle des véhicules alimentés à l'électricité ou à l'hydrogène, les problèmes liés à la production énergétique devant également être dûment pris en compte.

IV. Atténuation

A. Analyse bibliographique

24. Les effets des changements climatiques ne pourront être atténués sans transformer le secteur des transports. De nouvelles technologies seront utilisées pour fournir les services requis, et de nouveaux modes de vie devraient aussi être adoptés pour juguler les émissions de GES imputables aux transports. Dans la présente section, nous passons en revue des documents portant sur des mesures d'atténuation ou de réduction des émissions, y compris des solutions technologiques et des changements de comportement ou de mode de vie.

1. Solutions technologiques

25. Les choix technologiques devant être faits dans le secteur des transports afin de fortement réduire les émissions de GES sont examinés dans plusieurs publications sur la modélisation analytique ascendante du système énergétique. Ainsi, Labriet *et al.* (2005) analysent des scénarios de réduction des GES élaborés au moyen du modèle MARKAL-

Monde², qui inclut une description de 15 régions interconnectées. Ces scénarios montrent en particulier une évolution à long terme vers les carburants suivants dans les différents secteurs de la demande, y compris le secteur des transports.

Figure 3

Choix de carburants selon les scénarios de MARKAL-Monde – Parts de la consommation énergétique finale des différents secteurs d'utilisation finale

Total	%	BAU-A1B		550-A1B		BAU-FOS		550-FOS	
		2000	2050	2000	2050	2000	2050	2000	2050
Industrie	Biomasse	5,0	4,0	5,0	4,4	4,7	4,2	5,0	4,7
	Charbon	20,4	8,5	20,6	7,5	19,2	8,6	20,6	6,9
	Gaz	28,9	37,4	29,2	39,2	27,5	36,1	29,2	39,3
	Chaleur	0,5	0,6	0,5	1,5	0,4	0,6	0,5	1,1
	Pétrole	27,1	18,7	27,2	14,6	25,5	21,6	27,2	17,7
	Électricité	17,4	29,8	16,8	31,8	21,9	27,9	16,8	29,3
	Autres	0,7	0,9	0,7	0,9	0,7	1,0	0,7	1,0
Comm./Rés.	Biomasse	33,3	4,2	33,5	4,6	31,0	4,2	33,5	4,6
	Charbon	5,1	9,8	5,2	9,3	4,8	9,7	5,2	9,8
	Gaz	24,6	19,4	24,9	20,2	23,0	19,6	24,9	20,6
	Chaleur	5,7	2,3	5,7	2,4	5,3	2,3	5,7	2,4
	Pétrole	17,6	23,6	17,7	23,9	16,4	23,3	17,7	23,6
	Électricité	13,3	39,7	12,8	37,9	19,2	39,7	12,8	37,2
	Autres	0,2	1,0	0,2	1,6	0,2	1,2	0,2	1,8
Transports	Biomasse	0,4	11,1	0,4	22,6	1,0	13,0	0,4	25,9
	Charbon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gaz	1,0	12,2	1,0	12,3	0,3	8,2	1,0	12,3
	Hydrogène	0,0	12,2	0,0	12,3	2,3	14,3	0,0	12,3
	Pétrole	97,7	58,7	97,7	47,4	93,1	55,1	97,7	44,0
	Électricité	0,9	5,7	0,9	5,5	3,4	9,4	0,9	5,5

Source: Labriet *et al.* (2005).

26. Ces auteurs font état de résultats similaires avec le modèle d'évaluation intégrée TIMES (Labriet et Loulou (2008)). Il est avantageux d'examiner le secteur des transports à l'intérieur d'un véritable système énergétique mondial parce que cela permet d'établir un lien entre les choix énergétiques faits dans ce secteur et certains choix majeurs faits dans d'autres secteurs du système d'approvisionnement en énergie, par exemple la solution consistant à développer la production d'électricité et d'hydrogène sans rejeter d'émissions.

27. Dans le même esprit, Krzyzanowski *et al.* (2008) utilisent le modèle MARKAL global (GMM) pour évaluer la possibilité de développer une économie de l'hydrogène dans le secteur des transports. Ces auteurs examinent notamment les façons de soutenir efficacement une transition vers des moyens de transport alimentés à l'hydrogène. Ils soutiennent que de tels moyens de transport constituent une solution de rechange

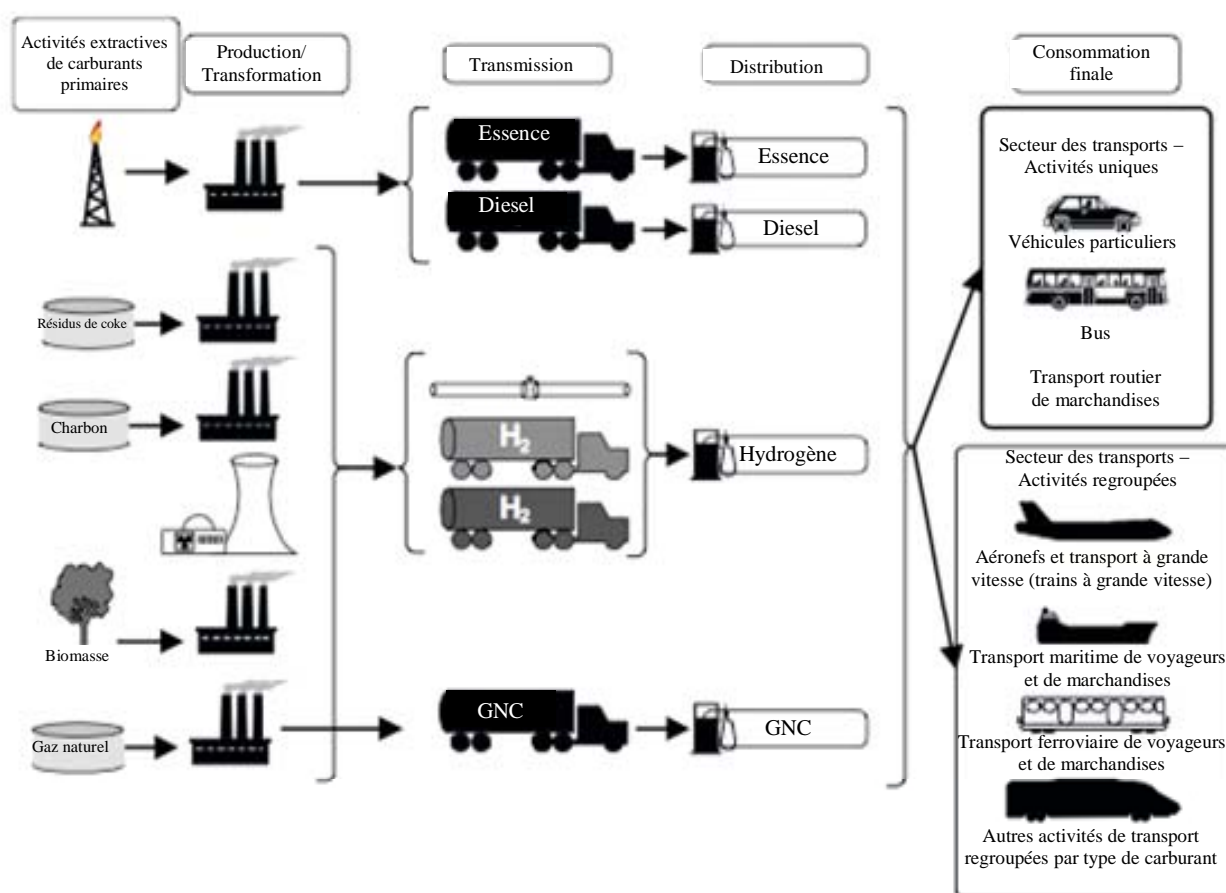
² Les modèles MARKAL et TIMES sont élaborés sous l'égide de l'ETSAP, un comité de mise en œuvre de l'AIE. Ces modèles sont décrits sur le site Web suivant: <http://www.etsap.org/Tools.asp>.

écologiquement rationnelle aux moyens de transport actuels, à base de pétrole. Se fondant sur les simulations qu'ils ont effectuées, ces auteurs prédisent qu'une telle transition pourrait avoir lieu à long terme. L'analyse montre en effet que, malgré des coûts initiaux élevés, une transition vers des moyens de transport à hydrogène pourrait être faite à long terme sous réserve qu'un certain nombre de modifications concomitantes soient apportées. Une transition à long terme nécessiterait surtout un important soutien externe, notamment sous la forme d'une aide publique à la recherche-développement-diffusion (R-D-D), et des investissements dans le domaine de l'apprentissage pour contribuer à ce que les technologies suivent la courbe d'apprentissage et deviennent concurrentielles à long terme.

28. La figure 4 reproduit la description simplifiée du secteur des transports utilisée dans le modèle MARKAL global.

Figure 4

Représentation du secteur des transports dans le GMM

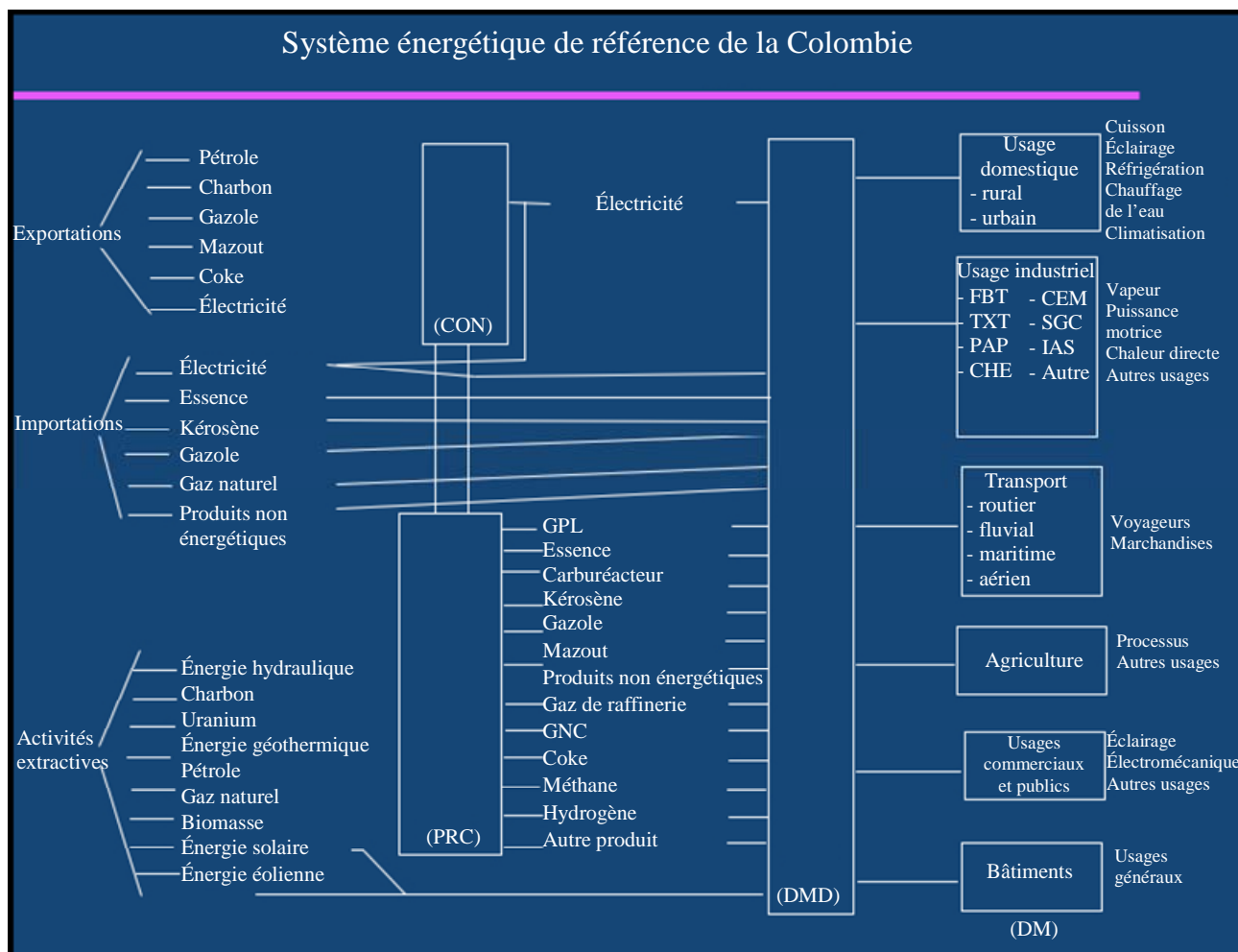


Source: Krzyzanowski *et al.* (2008).

29. Cet axe de recherche peut aussi être suivi pour analyser l'avenir des transports dans les pays en développement. Cadena et Haurie (2001) utilisent ainsi un modèle MARKAL pour analyser les questions qui intéressent la Colombie sur les plans énergétique et environnemental, étudiant notamment les projets mis en œuvre dans le cadre du mécanisme pour un développement propre (MDP).

30. La figure 5 reproduit partiellement le système énergétique de référence de MARKAL-Colombie, qui inclut le secteur des transports.

Figure 5
Le système énergétique de référence examiné au moyen du modèle MARKAL-Colombie



Source: Cadena et Haurie (2001).

31. Le même type d'analyse peut aussi être effectué plus localement comme l'indiquent Caratti *et al.* (2003), qui étudient le potentiel des voitures à pile à combustible dans un environnement urbain soumis à d'importantes limites en matière d'émissions de GES. Pour réaliser cette étude, les auteurs ont utilisé un modèle appelé MARKAL-Lite, une version du modèle MARKAL adaptée pour représenter les choix énergétiques et technologiques qui sont offerts au niveau local ou régional. Cette analyse est d'autant plus intéressante qu'elle explore les liens qui pourraient exister entre la constitution d'un imposant parc de voitures ou de camions électriques ou à pile à combustible et leur intégration au réseau de distribution d'électricité. Les voitures électriques permettraient de stocker de l'électricité alors que les voitures à pile à combustible pourraient être munies d'unités de production décentralisées.

32. Le secteur des transports peut aussi être analysé au moyen des modèles d'équilibre général calculable (EGC) qui ont été récemment élaborés pour étudier les incidences économiques des politiques liées aux changements climatiques. Bernard et Vielle (2008) ont par exemple établi le modèle d'équilibre général calculable GEMINI-E3, qui décrit la demande en matière de transport ainsi que les courbes des coûts marginaux de dépollution

et qui est utilisé pour établir des scénarios fondés sur une approche descendante des aspects économiques de l'atténuation des changements climatiques.

33. La figure 6 reproduit partiellement la nomenclature de GEMINI-E3, qui montre le contexte économique général dans lequel le secteur des transports doit être examiné.

Figure 6

Secteurs, combustibles et pays examinés au moyen de GEMINI-E3

<i>Pays ou régions</i>		<i>Secteurs</i>
Pays visés à l'annexe B		Produits énergétiques
Allemagne	DEU	01 Charbon
France	FRA	02 Pétrole brut
Royaume-Uni	GBR	03 Gaz naturel
Italie	ITA	04 Produits pétroliers raffinés
Espagne	ESP	05 Électricité
Pays-Bas	NLD	<i>Produits non énergétiques</i>
Belgique	BEL	06 Agriculture
Pologne	POL	07 Sylviculture
Reste de l'UE à 25	OEU	08 Produits minéraux
Suisse	CHE	09 Produits chimiques, caoutchouc, plastiques
Autres pays européens	XEU	10 Métaux et ouvrages en métaux
États-Unis d'Amérique	USA	11 Articles en papier, publication
Canada	CAN	12 Transports, n.c.a.
Australie et Nouvelle-Zélande	AUZ	13 Transport maritime
Japon	JAP	14 Transport aérien
Russie	RUS	15 Biens de consommation
Reste de l'ex-Union soviétique	XSU	16 Biens d'équipement
Pays non visés à l'annexe B		17 Services
Chine	CHI	18 Logement
Brésil	BRA	
Inde	IND	Secteur domestique
Mexique	MEX	
Venezuela	VEN	Matériaux
Reste de l'Amérique latine	LAT	Travail
Turquie	TUR	Capital
Reste de l'Asie	ASI	Énergie
Moyen-Orient	MID	Facteur fixe (secteur 01-03)
Tunisie	TUN	Autres intrants
Reste de l'Afrique	AFR	

Source: Bernard et Vielle (2008).

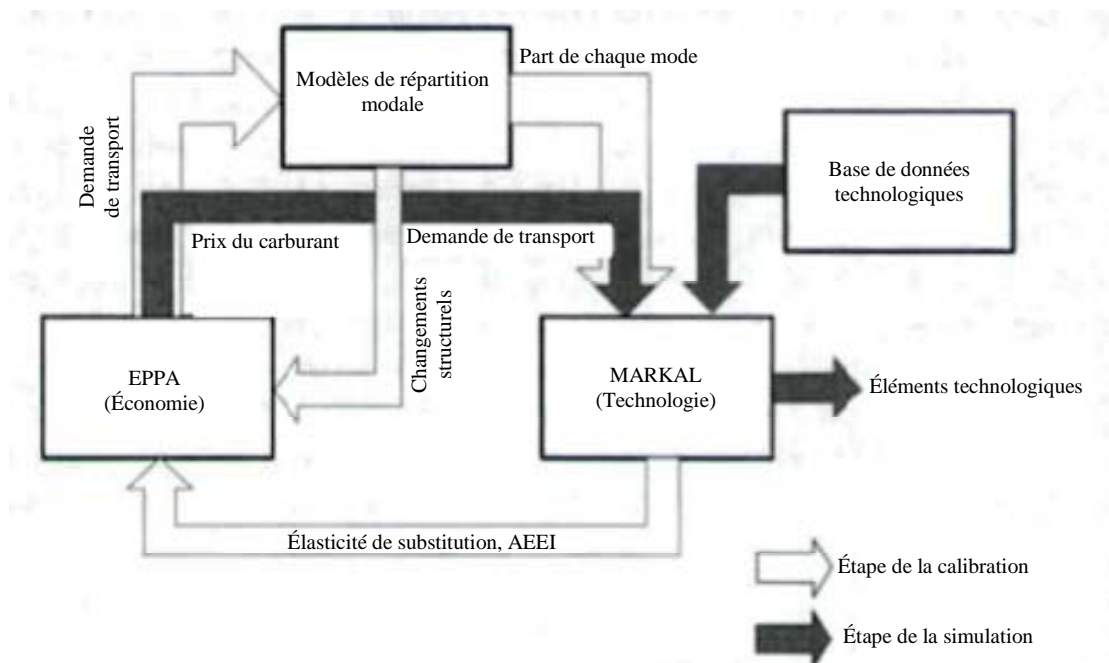
34. Des résultats intéressants peuvent être obtenus lorsqu'un modèle d'EGC «descendant» qui décrit les interactions macroéconomiques est associé à une analyse technico-économique «ascendante» qui représente les choix technologiques de façon détaillée, permettant ainsi de mieux évaluer les coûts marginaux de dépollution.

35. Schafer et Jacoby (2006) proposent quant à eux un modèle hybride EGC-MARKAL qui permet de faire des simulations, pour le secteur des transports, à partir de données économiques générales et de données technologiques de base. Cette approche utilise de surcroît un sous-modèle de choix modaux qui repose sur un temps de déplacement limité à 1,2 heure par personne et par jour. Le calibrage d'un tel système hybride est un exercice délicat. Dans le cas présenté, le calibrage a essentiellement été effectué dans un seul sens, du modèle MARKAL au modèle EPPA (Emissions Prediction and Policy Analysis).

36. La figure 7 reproduit le schéma représentant la méthode de couplage entre le modèle ascendant de type MARKAL, le modèle de répartition modale et le modèle descendant de type EPPA.

Figure 7

Procédures de couplage



Source: Schafer et Jacoby (2006).

37. D'autres modèles énergétiques détaillés permettent d'évaluer l'évolution du secteur des transports en cas d'adoption de politiques sur le climat plus strictes. Yan et Crookes (2009) analysent ainsi les futures tendances de la demande énergétique et des émissions de GES dans le secteur chinois des transports routiers et évaluent l'efficacité des différentes mesures de réduction possibles. À cette fin, ils utilisent le Système de planification à long terme des énergies de substitution (LEAP)³. Ces auteurs analysent les futures tendances concernant la demande énergétique totale, la demande de pétrole (y compris l'essence, le diesel et le gaz de pétrole liquide (GPL)) et les émissions de GES en Chine dans le cas d'un scénario de statu quo (BAU) ou du scénario le plus favorable (BC). L'analyse montre des

³ Pour plus d'informations sur le modèle LEAP, voir l'adresse: <http://www.energycommunity.org/default.asp>.

potentiels de réduction relatifs pouvant atteindre 40,5 % pour la consommation d'énergie, 46,5 % pour la consommation de pétrole et 39,9 % pour les émissions de GES. Nous reproduisons ci-après l'une des figures récapitulant ces résultats.

Figure 8

Réduction des émissions de GES en Chine, selon le scénario le plus favorable et le scénario du statu quo, et rôle de chaque mesure

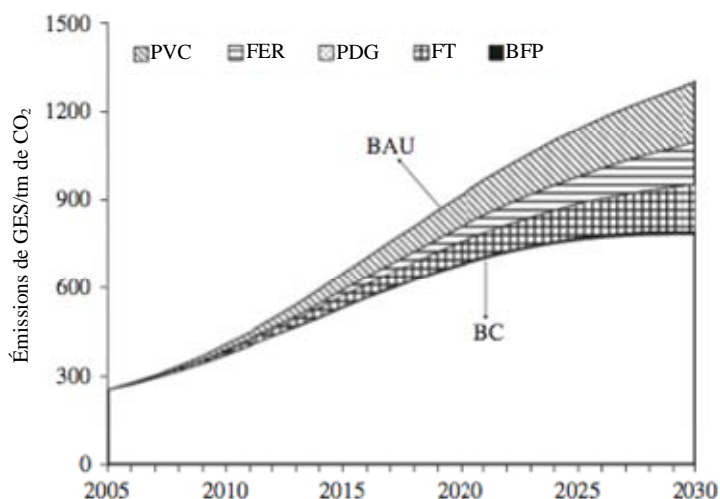


Fig. 6 Émissions de GES imputables au secteur chinois des transports routiers, 2005-2030

Tableau 10

Réduction attribuable à chaque type de mesure en 2030, en cas de maintien du statu quo
(En pourcentage)

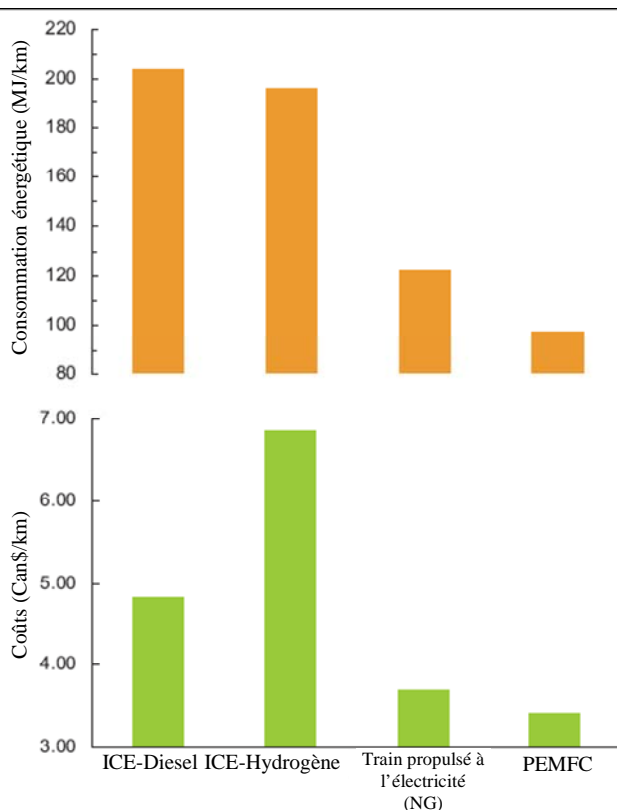
	<i>Demande énergétique totale</i>	<i>Demande de pétrole</i>	<i>Émissions de GES</i>
PVC	16.1	16.4	15.9
FER	13.1	13.3	13.0
PDG	1.0	1.7	0.6
FT	16.3	18.5	16.2
BFP	1.6	7.9	1.4

Source: Yan et Crookes (2009).

38. Les mesures envisagées concernent le contrôle des voitures particulières (PVC), la réglementation en matière de réduction de la consommation de carburant (FER), la promotion du diesel et du gaz (PDG), la taxe sur les carburants (FT) et la promotion des biocarburants (BFP). Elles n'incluent par contre pas la pénétration des nouvelles technologies sans carbone.

39. Les technologies peuvent également être évaluées à un niveau très local. Haseli *et al.* (2008) effectuent pour leur part une évaluation comparative des émissions de CO₂ générées par un train de voyageurs en Ontario (Canada), en fonction de quatre technologies spécifiques de propulsion: a) moteur diesel à combustion interne traditionnel (ICE); b) train propulsé à l'électricité; c) moteur à combustion interne à hydrogène; et d) train à pile à combustible à hydrogène (PEMFC). Le déplacement faisant l'objet de l'étude, d'une soixantaine de kilomètres, est effectué entre Oshawa et Toronto.

Figure 9
Consommation énergétique (graphique supérieur) et coûts de déplacement correspondants (graphique inférieur) pour des trains propulsés par diverses technologies



Source: Haseli *et al.* (2008).

40. Il est également intéressant de savoir que, selon ces auteurs, seule une voiture électrique respectant le scénario 1, fondé sur la production d'électricité (sources d'énergie renouvelables, y compris l'énergie nucléaire), et transportant (3 ou 4 personnes), peut faire concurrence au train moderne.

41. Lutsey et Sperling (2009) comparent les mesures d'atténuation des GES qui existent dans le secteur des transports à celles qui sont appliquées dans d'autres secteurs en établissant des courbes d'offre en fonction des technologies disponibles à court terme pour tous les principaux secteurs économiques des États-Unis. Ils utilisent à cette fin des courbes des coûts marginaux de dépollution, aussi appelées courbes d'offre sur l'atténuation des GES, reposant sur une approche ascendante. Les auteurs ne décrivent pas en détail les modèles qui ont été utilisés pour obtenir ces courbes de coûts marginaux. Ils concluent en précisant que, d'après l'analyse effectuée, de nombreuses stratégies en matière de transport sont économiquement rationnelles lorsqu'on les compare directement avec les mesures appliquées dans d'autres secteurs de l'économie faisant régulièrement l'objet d'hypothèses. Un grand nombre de mesures visant à améliorer le rendement énergétique des moyens de transport permettent en effet de réaliser des économies pendant toute la durée de l'investissement en équipement à haut rendement énergétique, alors que les futures économies d'énergie sont calculées en fonction de taux d'abattement normaux. Les auteurs constatent que de telles solutions, adoptées dans le secteur des transports, représentent la moitié des mesures qu'on n'a rien à perdre à appliquer dans tous les secteurs économiques.

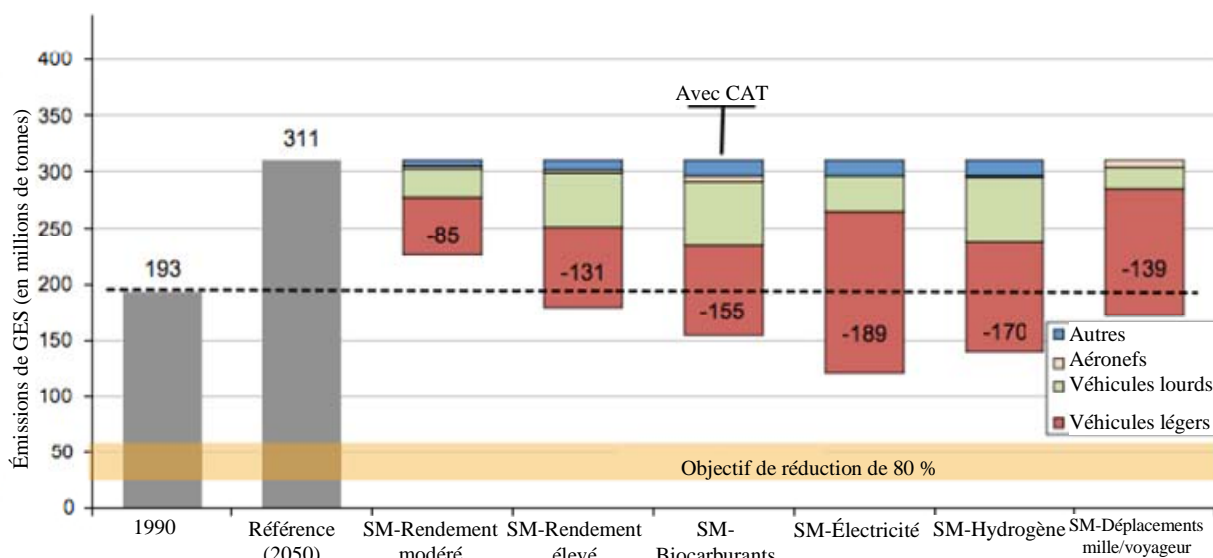
42. Yang *et al.* (2009) utilisent un cadre Kaya⁴, qui ventile les émissions de GES en fonction de la population, de l'intensité des transports, de l'intensité énergétique et de l'intensité de carbone, pour analyser ces émissions et les différentes mesures d'atténuation offertes en Californie afin de réduire les GES générés par les transports de 80 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici à 2050.

43. Ces auteurs font tout d'abord observer que, en Californie, c'est le secteur des transports qui est le principal responsable des émissions de GES, étant à l'origine de plus de 40 % des émissions générées dans cet État en 2006. Ils relèvent également qu'aucune mesure d'atténuation prise isolément ne peut permettre d'atteindre l'objectif établi, parce qu'il est prévu que la demande de transport augmentera de manière significative d'ici à 2050 et que les technologies de pointe et les combustibles avancés pourraient ne pas convenir à tous les sous-secteurs ou ne pas être suffisamment disponibles. Malgré tous les scénarios miracles (SM) mesurant l'incidence potentielle d'une nouvelle technologie «plus verte», aucune technologie ne permettrait d'atteindre l'objectif de 80 % en 2050 (voir la figure 10 tirée de cet article).

Figure 10

Réduction des émissions de GES, selon chaque scénario miracle envisagé concernant les niveaux de référence de 1990 et de 2050

Aucun des scénarios miracles ne permet d'atteindre l'objectif de 80 % en 2050



Source: Yang *et al.* (2009).

44. Les différents scénarios envisagés pour atteindre l'objectif de 80 % en 2050 sont les suivants: le scénario privilégiant les biocarburants à haut rendement énergétique, qui repose essentiellement sur des technologies de pointe visant à produire des carburants uniquement à partir de sources de cellulose et entraînant un «changement d'affectation des terres»

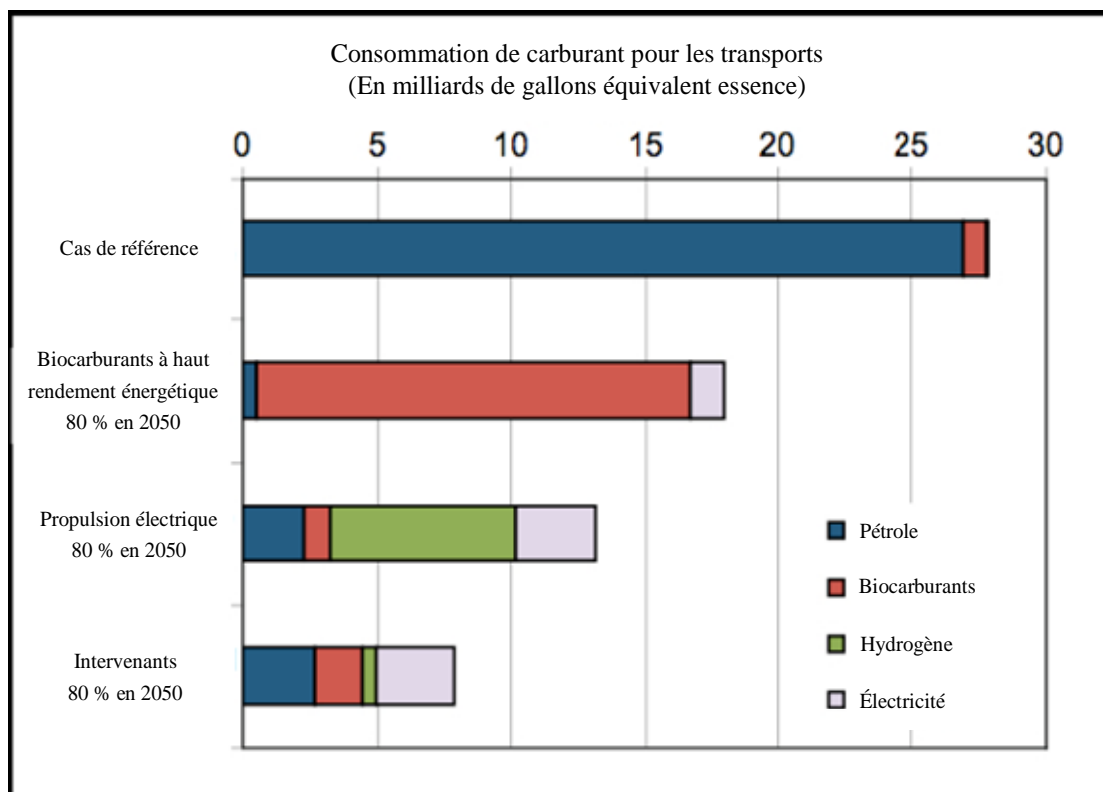
⁴ L'identité de Kaya est une équation qui relie des facteurs permettant de déterminer l'incidence de l'activité humaine sur le climat sous forme d'émissions d'un gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone. Elle part du principe que le niveau total d'émissions peut être établi en multipliant quatre paramètres: la population, le PIB par habitant, l'intensité énergétique par unité de PIB et les émissions de carbone par unité d'énergie consommée.

(CAT) minime; le scénario privilégiant la propulsion électrique, qui repose essentiellement sur des technologies de pointe dans ce domaine ainsi que sur l'hydrogène et l'électricité à faible émission de carbone (la disponibilité limitée des biocarburants peu générateurs de carbone restreignant leur utilisation); et le scénario axé sur les intervenants, qui prévoit que tous ceux-ci (entreprises, gouvernements et particuliers) sont prêts, compte tenu des prix très élevés de l'énergie, à réduire leur consommation énergétique et les émissions de GES, principalement en utilisant des véhicules plus petits et plus économiques sur le plan énergétique, en réduisant les activités de transport par habitant et en augmentant le coefficient d'occupation des véhicules.

45. Les auteurs de cette étude concluent que les scénarios cherchant à atteindre l'objectif de 80 % en 2050 montrent que cet objectif de réduction pourrait éventuellement être atteint de multiples façons. Les scénarios privilégiant soit les biocarburants à haut rendement énergétique, soit la propulsion électrique indiquent que si les technologies mises au point pour les véhicules et les carburants deviennent suffisamment propres, la Californie pourra conserver son degré actuel de mobilité. Le premier scénario prévoit un recours accru à l'énergie primaire et table essentiellement sur la biomasse, alors que le second mise sur une utilisation plus rationnelle des carburants et sur une combinaison beaucoup plus diversifiée de ressources. Le scénario axé sur la participation de tous les intervenants montre que les changements importants qui se produisent au niveau des comportements sociaux et des habitudes de déplacement constituent d'excellentes mesures d'atténuation, en particulier lorsque la technologie ne parvient pas à faire des miracles. C'est d'ailleurs ce scénario qui nécessite le moins de ressources énergétiques.

46. L'analyse de Sperling et Gordon (2008) s'inscrit dans le prolongement de cette recherche. En effet, dans une étude très détaillée, ces auteurs examinent les changements technologiques qui pourraient être apportés aux véhicules, en particulier aux voitures électriques ou à pile à combustible. Ils se penchent également sur deux problèmes fondamentaux: a) transformer les véhicules afin de réduire de façon radicale la consommation de pétrole et les émissions de GES; et b) transformer les imposants systèmes de transport de façon à élargir les moyens de mobilité personnelle tout en réduisant leur empreinte écologique. Il est intéressant de noter que, selon ces auteurs, la disponibilité d'une «électricité mobile» pourrait être l'élément déterminant du succès des véhicules à pile à combustible, rejoignant ainsi Caratti *et al.* (2003). Ils concluent que la Chine, l'Inde et certains autres pays en développement connaissant une expansion rapide doivent de toute urgence réduire leur dépendance à l'égard des véhicules. La voie de la motorisation privilégiant l'usage de la voiture, dans laquelle les États-Unis ont été les premiers à s'engager, s'avère très onéreuse, non seulement en termes d'énergie et d'environnement, mais aussi en raison des énormes coûts financiers et sociaux engagés pour établir de force un réseau de nouvelles routes dans des villes déjà importantes et densément peuplées. Ces pays en développement doivent emprunter une nouvelle voie, qui a peu de chances d'être marquée par des technologies leur permettant de brûler certaines étapes du développement.

Figure 11
Consommation de carburant pour les transports d'ici à 2050, selon les différents scénarios envisagés pour atteindre l'objectif de 80 % en 2050



Source: Yang *et al.* (2009).

47. Examinant un problème propre à Taiwan, Liao *et al.* (2009) étudient les émissions de dioxyde de carbone imputables aux transports intérieurs effectués uniquement par des camions et les comparent avec celles générées par les déplacements faisant intervenir navigation côtière et camions. Ces auteurs utilisent une méthode de modélisation fondée sur les activités. L'étude qu'ils ont effectuée montre qu'il est possible de réduire les émissions de CO₂ en recourant à la combinaison navigation côtière-camions plutôt qu'au seul transport par camions pour exporter/importer des conteneurs à Taiwan. Les réductions d'émissions de CO₂ sont principalement attribuables au fait que les carburants utilisés pour le volet maritime (pétrole lourd et diesel) ont un meilleur rendement énergétique que le diesel utilisé par les camions.

48. Dans une étude de cas concernant l'Australie, Stanley *et al.* (2009) examinent deux objectifs de réduction des émissions de GES imputables au transport routier qui pourraient être fixés pour 2020 et 2050, et les répercussions que cela pourrait avoir pour le secteur.

49. S'agissant de l'objectif établi pour 2020 (réduction de 20 % par rapport aux niveaux d'émissions de 2000), l'étude publiée suggère les six solutions suivantes: a) réduire le nombre de kilomètres parcourus en voiture; b) augmenter la part des déplacements urbains qui sont faits à pied et à vélo; c) accroître la part des déplacements urbains motorisés qui sont faits par des moyens de transport public; d) accroître le coefficient d'occupation des automobiles lors des déplacements urbains; e) réduire la consommation énergétique prévue pour le transport routier; et f) améliorer le rendement énergétique des véhicules.

50. S'agissant de l'objectif établi pour 2050 (réduction de 80 % par rapport aux niveaux de 2000), les auteurs affirment que la seule solution est de modifier de manière significative les comportements en matière de déplacement pour accroître le rôle des moyens de transport émettant peu de carbone et/ou d'abaisser l'objectif de réduction des émissions pour le secteur des transports, ce qui alourdit le fardeau que les autres secteurs doivent assumer.

51. Enfin, il convient de mentionner l'analyse multicritères effectuée par Granovskii *et al.* (2006), qui comparent les véhicules traditionnels, hybrides, électriques et à pile à combustible à hydrogène en utilisant des indicateurs économiques et environnementaux. La méthode utilisée permet d'établir une hiérarchie des différentes technologies.

2. Changements de mode de vie

52. Les recherches visant à évaluer les changements de mode de vie qui favoriseraient un transport durable sont beaucoup moins nombreuses que celles portant sur les solutions technologiques.

53. Dans un document concomitant à celui de Yang *et al.* (2009), McCollum et Yang (2009) étudient la possibilité de réduire radicalement et à long terme les émissions de GES imputables au secteur des transports des États-Unis (réductions de 50 à 80 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici à 2050). Ces auteurs construisent ainsi des scénarios pour déterminer la façon de parvenir à une décarbonation aussi importante en recourant à des technologies de pointe pour les véhicules et à des carburants avancés et en préconisant différentes solutions pour changer les comportements. Ils concluent que les scénarios confirment les résultats d'autres études selon lesquels aucune mesure d'atténuation prise isolément ne permettrait d'atteindre ces objectifs ambitieux, principalement parce qu'on prévoit que le nombre des déplacements qui seront effectués dans chaque sous-secteur connaîtra une forte hausse d'ici à 2050. Ce constat signifie que les technologies qui concernent les véhicules et les carburants doivent essentiellement être axées sur la décarbonation; les auteurs estiment qu'il est déraisonnable de penser qu'une solution technologique peut permettre à elle seule d'atteindre cet objectif, compte tenu de la diversité des types de véhicules et des besoins du secteur des transports.

54. Grazi *et al.* (2008) se penchent pour leur part sur la question de savoir si le caractère urbain influe sur les choix de déplacement, en ventilant la demande à cet égard en fonction de la répartition modale et des trajets journaliers effectués pour chaque mode de transport. Globalement, le caractère urbain et par conséquent les politiques qui l'affectent, telles que la planification de l'environnement et des transports, méritent qu'on s'y attarde davantage lors des débats concernant les politiques sur le climat, puisque ces aspects peuvent contribuer à réduire les GES. Par exemple, la planification des transports peut tenter d'accélérer le transfert modal en accroissant la densité urbaine grâce à l'établissement de nouveaux réseaux de transports publics, comme la nouvelle ligne de métro qui doit être construite au centre-ville d'Amsterdam, permettant par là même la mise en place d'une infrastructure de transport plus efficace ainsi que la création de nouvelles voies rapides pour les bus et de voies réservées aux cyclistes.

55. Caulfield (2009) examine les pratiques de covoiturage adoptées à Dublin et évalue les avantages que cette solution présente pour l'environnement tant en termes de réduction des émissions que de distances parcourues.

56. Wright et Fulton (2005) recourent quant à eux à des scénarios pour examiner l'ampleur et les coûts des différentes options qui pourraient permettre de réduire les émissions imputables au secteur des transports des pays en développement. Ils comparent en particulier ce qu'il en coûterait de réduire les émissions de GES en fonction des différentes solutions technologiques envisagées pour les carburants ou des mesures

favorisant le transfert modal. Cette analyse comparative indique qu'un large éventail de mesures mettant surtout l'accent sur un tel transfert constitue probablement le moyen le plus rationnel de réduire les émissions de GES.

B. Analyse et lacunes éventuelles des recherches répertoriées

57. La plupart des solutions technologiques permettant d'atténuer les changements climatiques imputables aux transports peuvent être analysées à l'aide de modèles ascendants. Les modèles LEAP, MARKAL ou TIMES ont ainsi été utilisés pour représenter les différentes options technologiques et énergétiques offertes dans le domaine des transports en vue de l'évolution du système global d'approvisionnement en énergie (Labriet *et al.* (2005), Caratti *et al.* (2003), Krzyzanowski *et al.* (2008), Cadena et Haurie (2001)). Une approche descendante, fondée sur l'utilisation de modèles d'équilibre général calculable, peut également être associée à une analyse ascendante effectuée au moyen de modèles de type MARKAL (Schafer et Jacoby (2006)). L'axe reliant les modèles ascendants et descendants représente la courbe des «coûts marginaux de dépollution», qui peut être établie à l'aide d'un modèle intégré d'approvisionnement en énergie comme MARKAL ou d'un modèle plus spécifique au secteur des transports (Lutsey et Sperling (2009), Yan et Crookes (2009)). Les autres publications abordées dans la présente section analysent des solutions technologiques spécifiques (Granovskii *et al.* (2006), Liao *et al.* (2009), ou des solutions spécifiques à certains pays ou à certaines régions (Stanley *et al.* (2009), Yan et Crookes (2009), Yang *et al.* (2009)). Une étude (Sperling et Gordon (2008)) examine même le débat plus vaste qui oppose ceux qui souhaitent améliorer les technologies existantes et ceux qui préfèrent transformer le système des transports.

58. S'agissant des lacunes éventuelles des recherches effectuées, nous estimons que l'amélioration récente des analyses descendantes et ascendantes sur l'économie et la filière énergétique mondiales, notamment une description plus précise des pays émergents (Brésil, Russie, Inde et Chine (BRIC)), ainsi que les progrès accomplis avec les méthodes de couplage entre les modèles ascendants et les modèles descendants, devraient être exploités pour concevoir des scénarios en vue de la mise en œuvre de systèmes de transports durables dans les pays émergents et en développement. Une analyse similaire pourrait aussi être réalisée pour l'Union européenne (UE), compte tenu qu'il existe des modèles bien calibrés d'équilibre général calculable (GEMINI-E3, Bernard et Vielle (2008)) et des modèles axés sur les technologies (TIMES Labriet et Loulou (2008)) pour cette région du monde.

59. De nouveaux modèles quantitatifs comme LEAP, MARKAL, TIMES ou GEMINI-E3, qui incluraient des mesures visant à modifier la structure de la demande d'énergie ou de services de transport, devraient être élaborés. Un modèle devrait aussi être conçu pour généraliser, et intégrer dans une approche ascendante, les avantages offerts par les nouvelles technologies et les améliorations bénéficiant à l'ensemble du système dans le secteur des transports, comme le proposent Sperling et Gordon (2008). Des études devraient en particulier être effectuées sur la nécessité d'obtenir des pouvoirs publics qu'ils investissent activement dans l'infrastructure requise pour développer des voitures électriques ou à pile à combustible.

V. Vulnérabilité et adaptation

A. Analyse bibliographique

60. Les preuves de plus en plus nombreuses de l'existence des changements climatiques semblent avoir éveillé un intérêt croissant pour le revers de la médaille, c'est-à-dire

l'incidence des changements climatiques sur les transports et les mesures potentielles d'adaptation. Des événements comme l'ouragan Katrina ont montré à quel point nos sociétés, notamment nos systèmes de transport, étaient vulnérables aux variations climatiques. Dans leur rapport détaillé sur les impacts de la variabilité et des changements climatiques sur les systèmes et l'infrastructure de transport, effectué dans le cadre d'une étude sur la côte américaine du golfe du Mexique, Savonis *et al.* (2008) s'attardent sur les répercussions que l'ouragan Katrina a eues sur cette infrastructure, en particulier sur les oléoducs. Ils soulignent ainsi que, lorsque les perturbations causées par l'ouragan ont atteint leur point culminant, tous les principaux oléoducs de la région étaient hors d'usage en raison de coupures de courant. Le 4 septembre 2005, soit cinq jours après la tempête, tous les principaux oléoducs utilisés pour le transport du brut et des produits raffinés étaient à nouveau en état de fonctionner à pleine capacité ou presque. Dans leurs conclusions, les auteurs mettent en évidence les incidences des changements climatiques sur la planification du transport, c'est-à-dire un rallongement des délais de planification, la connectivité du système intermodal et la nécessité de procéder à une analyse intégrée. Ils indiquent enfin que les données et les projections climatiques, les outils d'analyse des risques, les analyses spécifiques à chaque région et les recherches interdisciplinaires constituent les principaux instruments permettant d'évaluer de façon appropriée les impacts des changements climatiques sur l'infrastructure et les services de transport.

61. Un autre rapport détaillé (National Research Council (2008)) décrit les impacts potentiels des changements climatiques sur l'ensemble du secteur des transports américain. Les auteurs de ce rapport présentent les impacts majeurs des changements climatiques sur l'infrastructure et les activités de transport, tels que reproduits au tableau 1. Enfin, ils concluent en formulant 14 recommandations concernant la planification dans ce domaine, notamment la prolongation des délais au-delà des vingt ou trente ans habituellement prévus pour permettre de tenir dûment compte des changements climatiques.

62. Dans leur chapitre sur les transports, Lemmen et Warren (2004) font également un survol des recherches effectuées sur les impacts des changements climatiques et les mesures d'adaptation qui concernent en particulier le Canada. Ils soulignent que les connaissances sur les impacts potentiels des changements climatiques et les stratégies d'adaptation dans le secteur des transports présentent de nombreuses lacunes. «Compte tenu du peu de travail réalisé jusqu'à maintenant sur ce sujet, de plus amples études s'imposent sur presque tous les aspects de la question. Voici une liste des priorités recensées dans les références citées dans le présent chapitre:

- a) Porter une plus grande attention aux impacts et à l'adaptation dans le secteur du transport routier dans le sud du Canada;
- b) Accroître la recherche sur la vulnérabilité des routes canadiennes aux variations des températures, notamment les cycles de gel-dégel et les températures extrêmes;
- c) Évaluer l'importance des événements météorologiques extrêmes et de la variabilité climatique pour la conception, le coût, la mobilité et la sûreté des réseaux de transport canadiens;
- d) Évaluer de manière plus approfondie les mesures d'adaptation actuelles et la possibilité qu'elles offrent de reporter des améliorations aux infrastructures, de réduire les coûts d'exploitation et de maintenir, voire améliorer, la mobilité et la sécurité;
- e) Réaliser des études exhaustives sur des problèmes importants qui se posent dans le domaine du transport maritime et de la navigation, notamment la question de l'ouverture du passage du Nord-Ouest et celle de l'abaissement des niveaux d'eau dans le réseau des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent;

f) Analyser comment les variations des facteurs non climatiques, comme la technologie, l'occupation du territoire et l'économie, influent sur la vulnérabilité au climat et au changement climatique;

g) Réaliser des études où la question de l'atténuation (réduction des émissions de gaz à effet de serre) est intégrée à celles des impacts du changement climatique et de l'adaptation.».

63. Dans leur étude des publications empiriques sur les effets des changements climatiques et des conditions météorologiques sur le secteur des transports, Koetze et Rietveld (2009) soulignent aussi le fait que beaucoup moins d'ouvrages ont été publiés sur les impacts des changements climatiques et sur l'adaptation à ceux-ci que sur les mesures d'atténuation. Ces auteurs résument partiellement leurs conclusions en disant qu'à l'échelle mondiale en particulier, la hausse des températures peut entraîner une évolution des activités touristiques et des séjours à la montagne, avec les changements que cela comporte sur le plan du transport des voyageurs. On peut aussi s'attendre à une réorientation globale de la production agricole, avec les changements que cela implique sur le plan du transport des marchandises. L'élévation prévue du niveau de la mer et l'augmentation connexe de la fréquence et de l'intensité des marées de tempête et des inondations pourraient en outre faire partie des conséquences les plus préoccupantes des changements climatiques, en particulier pour les régions côtières. Les recherches empiriques qui concernent l'Europe sont peu nombreuses, mais celles qui ont été réalisées au sujet de la côte Est des États-Unis et de la région du golfe du Mexique montrent que les effets sur les transports et les infrastructures de transport pourraient être considérables. Toutefois, comme les mécanismes de protection contre les inondations qui sont déjà en place ne sont inclus dans aucune des recherches, les données disponibles pourraient n'avoir qu'une valeur limitée pour évaluer les risques d'inondation et les dangers encourus dans des régions spécifiques; en outre, elles surestiment probablement les dangers et les dommages imputables aux changements climatiques. L'évolution des conditions météorologiques résultant des changements climatiques pourrait également ébranler l'infrastructure. Dans le cas du transport routier, la plupart des études portent sur la sécurité routière et l'encombrement de la circulation. S'agissant de la sécurité routière, les précipitations constituent la variable de loin la plus importante parce que, selon la majorité des études, elles accroissent la fréquence des accidents mais en diminuent la gravité. Il est ainsi probable que les précipitations incitent les conducteurs à réduire leur vitesse, diminuant par le fait même la sévérité des accidents qui se produisent. En outre, la plupart des études montrent que les précipitations, en particulier la neige, entraînent une baisse de la vitesse de circulation. Il est intéressant de noter que ce phénomène est particulièrement manifeste durant les heures de pointe et sur les voies de circulation encombrées. Les rares données disponibles concernant le transport ferroviaire indiquent que les températures élevées, la formation de givre et les vents violents, pour ne nommer que ceux-ci, peuvent entraîner des retards considérables. Pour le secteur de l'aviation, la vitesse des vents, leur direction et la visibilité ont des effets manifestes sur la sécurité, les retards et les annulations. Tous ces facteurs ont des répercussions économiques importantes, tant pour les compagnies aériennes que pour les voyageurs. Toutefois, l'incidence des changements climatiques sur la vitesse des vents, en particulier sur leur direction, ainsi que sur la formation de brume ou de brouillard et sur la visibilité est hautement incertaine. Enfin, les changements qui surviennent au niveau des températures et des précipitations influent sur le niveau des cours d'eau. Un faible niveau d'eau obligera les navires empruntant les voies navigables intérieures à n'utiliser qu'une partie de leur capacité maximale, ce qui pourrait se solder par une hausse considérable des coûts de transport par la suite.

Tableau 1
Changements climatiques potentiels et exemples d'impacts sur les transports

<i>Changements climatiques potentiels</i>	<i>Exemples d'impacts sur les activités</i>	<i>Exemples d'impacts sur les infrastructures</i>
Augmentation du nombre de journées très chaudes et de canicules	Impact sur les limites de charge au décollage pour des aéroports situés en haute altitude ou soumis à des températures très chaudes et ne disposant pas de pistes suffisamment longues, entraînant des annulations de vols ou limitant la charge payante (c'est-à-dire des restrictions de poids), ou les deux. Périodes de construction limitées pour des raisons de santé et de sécurité.	Dilatation thermique des joints de ponts et des surfaces revêtues. Préoccupations concernant l'intégrité des voies de circulation (par exemple ramollissement de la surface), formation d'ornières par la circulation, déplacement d'asphalte liquide. Déformation des voies ferrées.
Hausse des températures de l'Arctique	Allongement de la période de navigation et augmentation du nombre de ports libres de glaces dans les régions septentrionales. Ouverture éventuelle d'une route maritime du Nord ou d'un passage du Nord-Ouest.	Dégel du permafrost, causant l'affaissement de routes, de l'assiette des rails, d'appuis de pont et d'oléoducs ainsi que la dégradation des fondations des pistes. Raccourcissement de la période d'utilisation des ponts de glace.
Élévation du niveau de la mer, associée à des marées de tempête	Interruptions plus fréquentes des déplacements routiers et ferroviaires en région côtière ou de faible altitude en raison des marées de tempête. Marées de tempête plus importantes nécessitant des évacuations ou des changements des schémas de développement. Fermeture ou restrictions pouvant toucher plusieurs des 50 principaux aéroports situés en zones côtières, affectant les services offerts dans les zones les plus densément peuplées des États-Unis.	Inondation de routes, de voies ferrées et de pistes d'aéroport situées en zones côtières. Inondations plus fréquentes ou plus importantes de tunnels souterrains et d'infrastructures de faible élévation. Érosion de l'infrastructure routière et des appuis de pont. Réduction de la hauteur libre sous les ponts. Modification des installations portuaires pour faire face à des marées plus hautes et à des marées de tempête.
Hausse du nombre d'événements de précipitation	Augmentation des retards et des problèmes de circulation liés aux conditions météorologiques. Augmentation des inondations d'itinéraires d'évacuation. Augmentation des retards des compagnies aériennes imputables aux mauvais temps résultant d'une forte convection.	Augmentation des inondations de routes, de lignes ferroviaires, de tunnels souterrains et de pistes. Augmentation du nombre de routes emportées par les eaux, des dommages causés aux structures d'appui de l'assiette des rails ainsi que des glissements de terrain et coulées de boue qui endommagent les routes et voies ferrées. Augmentation de l'érosion des oléoducs et des dommages causés à ceux-ci.
Augmentation de la fréquence des ouragans de très forte intensité (catégorie 4 ou 5)	Interruptions plus fréquentes des services aériens. Évacuations d'urgence plus fréquentes et peut-être plus importantes. Débris plus nombreux sur les routes et les lignes ferroviaires, interrompant les déplacements et le transport de marchandises.	Probabilité plus forte de pannes des infrastructures. Stabilité du tablier des ponts davantage menacée. Impacts des vagues et des marées de tempêtes sur l'infrastructure portuaire.

Source: National Research Council (2008).

64. De façon plus spécifique, Jonkeren *et al.* (2009) utilisent plusieurs scénarios climatiques pour évaluer les effets d'une baisse du niveau des eaux sur les coûts des activités de transport et la répartition modale de la navigation intérieure dans le Nord-Ouest de l'Europe. Ils estiment que les changements climatiques sont susceptibles d'influer sur le prix des transports par voies navigables intérieures, car la baisse du niveau des eaux pourrait favoriser les transports ferroviaire et routier au détriment de la navigation intérieure. Ils ont étudié cette question au moyen de NODUS, un système d'information géographique (SIG) conçu pour la modélisation de réseaux stratégiques de transport de marchandises qui combine l'offre, la demande et les coûts pour déterminer les flux de transport d'un réseau multimodal. Ces auteurs ont tout d'abord imaginé un scénario de base reposant sur une année fictive et sur la moyenne des niveaux d'eaux quotidiens établie à partir des modèles de 1986 à 1995. Ils ont également bâti d'autres scénarios s'inspirant de plusieurs scénarios climatiques prévoyant une hausse des coûts de la navigation intérieure imputable aux faibles niveaux des eaux. S'agissant du scénario de base, les auteurs ont estimé que le volume annuel de marchandises transportées par barge diminuait d'environ 2,3 % dans le cas du scénario climatique M+ de KNMI'06⁵ et d'environ 5,4 % dans le cas du scénario W+ du marché du Rhin desservant la région de Kaub. Le nombre de kilomètres parcourus par des véhicules routiers et le volume des émissions de CO₂ augmentaient alors d'environ 1 %.

65. Si la navigation intérieure risque fort d'être affectée par les changements climatiques, d'autres modes de transport sont également concernés. Ainsi, Lindgren *et al.* (2009) résument une étude de cas sur la vulnérabilité future et la capacité d'adaptation du réseau ferroviaire suédois face aux changements climatiques. Ils procèdent aussi à un examen complet des publications récentes portant à la fois sur l'adaptation et les transports. Ces auteurs concluent qu'il sera sans aucun doute difficile pour le secteur ferroviaire de faire face aux futurs changements climatiques, et que sa capacité d'adaptation sera véritablement mise à l'épreuve durant les décennies à venir. Cette étude de cas met en évidence plusieurs menaces liées au climat qui pourraient avoir de graves répercussions pour le système ferroviaire, les principales émergeant de l'élévation du niveau des cours d'eau et de la nappe aquifère, de la violence des vents et de la hausse rapide des températures, toutes des conséquences éventuelles des changements climatiques. D'autre part, ces changements peuvent aussi avoir un effet positif en réduisant la vulnérabilité de certains pays, en particulier dans le nord de l'Europe, en raison du radoucissement des températures hivernales.

66. Le chapitre 4.3 de Savonis *et al.* (2008) fait état de quelques études de cas sur l'adaptation des infrastructures de transport aux changements climatiques, et donne comme exemple d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer la surélévation d'une autoroute. Les auteurs citent ainsi l'autoroute 1, en Louisiane, dont certaines parties sont sur le point d'être surélevées, et soulignent que l'ouragan Katrina a joué un rôle important en termes de sensibilisation à la vulnérabilité.

67. Les changements climatiques sont aussi très susceptibles d'avoir un impact considérable sur les systèmes de transport urbain des villes côtières. Suarez *et al.* (2005) étudient quant à eux les répercussions des inondations et des changements climatiques sur le transport urbain de la région métropolitaine de Boston. Ils concluent que l'infrastructure urbaine de cette région, déjà saturée, ne devrait pas être modifiée en profondeur si on la compare avec d'autres régions métropolitaines des États-Unis et du monde. Le système de transport bénéficiant d'un important réseau de réserve, l'ensemble du système n'est pas trop vulnérable aux phénomènes extrêmes. En conséquence, il n'est guère possible de modifier

⁵ Le sigle «KNMI» désigne l'Institut météorologique royal des Pays-Bas.

l'infrastructure existante à partir des résultats de cette modélisation. Toutefois, dans le cas des régions urbaines dont l'utilisation des terres connaît une conversion plus rapide ou qui sont situées dans des zones plus à risque, la méthodologie présentée dans cette publication peut s'avérer très utile pour examiner les différents choix offerts pour orienter la croissance urbaine et élaborer un plan intégré de gestion des systèmes de transport menacés par des risques accrus d'inondation.

68. Plus globalement, Jaroszweski *et al.* (2009) soulignent la nécessité d'adopter une approche interdisciplinaire permettant d'évaluer les impacts des changements climatiques en faisant appel à des scénarios climatiques et socioéconomiques. Les auteurs insistent sur le fait qu'on ne peut prédire la nature de la société de demain. Il est toutefois possible de présenter un éventail des scénarios qui pourraient se produire. La conception de tels cas de figure joue un rôle essentiel dans l'évaluation appropriée de l'impact des changements climatiques. Les facteurs socioéconomiques qui prévaudront au cours des cents prochaines années détermineront dans quelle mesure le réseau de transport du futur sera vulnérable aux phénomènes météorologiques. Cette évaluation sera l'élément moteur des projets d'infrastructure qui seront entrepris durant cette période et déterminera leur utilisation. La conception d'une gamme de scénarios permettra aux gouvernements, aux organisations et aux entreprises de mieux connaître les instruments dans lesquels ils investiront.

69. Pour sa part, l'Institution of Mechanical Engineers (2008) examine, au moyen du modèle GENIE-1 (<http://www.genie.ac.uk/>), les prédictions concernant les changements climatiques affectant trois régions géographiques (Royaume-Uni, Shanghai (Chine) et Botswana), sélectionnées parce qu'elles ont un climat différent – maritime, de mousson et continental – et qu'elles en sont à divers stades de développement économique. Cet organisme est fermement convaincu que si nous ne nous adaptons pas aux changements climatiques, nous risquons de connaître un avenir difficile. Il estime également que l'adaptation est la prochaine tâche à laquelle les ingénieurs doivent s'atteler et souligne que tous les modes de transport actuels seront toujours utilisés dans cent ou deux cents ans, mais sous une forme différente. Les infrastructures en place devront en grande partie être évaluées pour déterminer leur vulnérabilité et leur résistance aux changements climatiques. Les organes de planification devront envisager d'autres voies, un accroissement de la capacité et un système de réserve, en particulier dans le cas du transport ferroviaire, dont les infrastructures sont principalement situées dans des plaines d'inondation et des zones côtières.

B. Analyse et lacunes éventuelles des recherches répertoriées

70. Les changements climatiques qui pourraient avoir un impact direct sur l'infrastructure de transport sont l'élévation du niveau de la mer (océans), la baisse du niveau des eaux (cours d'eau) ainsi que les marées de tempête et les inondations (Koetze et Rietveld (2009)). Il est plus difficile d'évaluer les répercussions sur la demande de transport (marchandises, produits agricoles et voyageurs), mais l'ouverture éventuelle d'une route maritime du Nord ou d'un passage du Nord-Ouest pourrait avoir des conséquences importantes sur le transport international de marchandises.

71. L'évaluation de l'incidence du climat sur les transports est un problème majeur (Jaroszweski *et al.* (2009)) qui nécessite une solution globale. Il pourrait être intéressant de développer ce domaine de recherche, probablement dans le cadre d'une modélisation globale.

72. Plusieurs recherches ont été réalisées aux États-Unis (National Research Council (2008), Savonis *et al.* (2008), Suarez *et al.* (2005)), au Canada (Lemmen et Warren (2004)) et en Europe (Jonkeren *et al.* (2009)), certaines d'entre elles portant essentiellement sur les impacts résultant des inondations et de l'élévation du niveau de la mer. Les recherches sur

l'adaptation dans les pays en développement demeurent rares, et certaines d'entre elles, comme Molua (2009), ne traitent aucunement des impacts des changements climatiques sur les transports. En conséquence, la recherche pourrait être élargie aux pays en développement et plus particulièrement aux pays du Moyen-Orient, de l'Afrique du Nord et de l'Asie de l'Est, régions connues pour leur grande vulnérabilité.

73. Il demeure encore très difficile d'évaluer les politiques d'adaptation (Lemmen et Warren (2004), Lindgren *et al.* (2009)). Aujourd'hui, la plupart des mesures d'adaptation sont prises en réaction à la variabilité du climat. Les gouvernements doivent maintenant déterminer la façon d'inclure les changements climatiques à long terme dans les stratégies et la planification des systèmes de transport. Enfin, il serait également intéressant d'évaluer les projets d'adaptation existants.

VI. Liste des revues spécialisées, par domaine

A. Science des transports

- a) Transportation research Part A
- b) Transportation research Part D
- c) Transport Reviews

B. Géographie et économie

- a) Journal of Transport Geography

C. Sciences politiques

- a) Political Science

D. Ingénierie

- a) European Journal of Transport and Infrastructure research
- b) The IES Journal Part A: Civil and structural Engineering

E. Énergie

- a) Energy
- b) Energy Journal
- c) Energy Policy
- d) International Journal of Hydrogen Energy

F. Sciences de l'environnement

- a) The Annual Review of Environment and Resources

VI. Bibliographie

- Agence européenne pour l'environnement. *Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union, Vol. 3.* 2009. 3, 5.
- Agence internationale de l'énergie. *Transport, Energy and CO₂: moving towards sustainability.* 2009. 2, 3.
- Bernard, A. et Vielle, M. *GEMINI-E3, a general equilibrium model of international national interactions between economy, energy and the environment.* Computational Management Science, 5(3):173-206, 2008. 13, 24.
- Cadena, A. et Haurie, A. *Modelling energy and environmental issues for a developing country.* Journal of the Operational Research Society of India, 38(1):44-66, 2001. 10, 12, 24.
- Caratti, P. *et al. Exploring the Fuel Cell Car Future: an Integrated Energy Model at the City Level.* WIT Press, Southampton, 2003. 10, 22, 24.
- Caulfield, Brian. *Estimating the environmental benefits of ride-sharing: A case study of Dublin.* Transportation research Part D, 14:527-531, 2009. 23.
- Chapman, Lee. *Transport and climate change: a review.* Journal of transport geography, 15:354-367, 2007. 2.
- Chen, Chialin et Zhang, Jung. *The inconvenient truth about improving vehicle fuel efficiency: A multi-attributes analysis of the technology efficient frontier of the US automobile industry.* Transportation research Part D, 14:22-31, 2009. 6, 8.
- Creutzig, Felix et He, Dongquan. *Climate change mitigation and co-benefits of feasible transport demand policies in Beijing.* Transportation research Part D, 13:120-131, 2009. 4, 7.
- Flamm, Bradley. *The impacts of environmental knowledge and attitudes on vehicle ownership and use.* Transportation research Part D, 14:272-279, 2009. 6, 8.
- Granovskii, Mikhail, Dincer, Ibrahim et Rosen, Marc A. *Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles.* Journal of Power Sources, 159(2):1186-1193, 2006. 22, 24.
- Grazi, Fabio, van den Bergh, Jeroen C. J. M et van Ommeren, Jos N. *An empirical analysis of urban form, transport, and global warming.* Energy Journal, 29(4):97-122, 2008. ISSN 01956574. 23.
- Han, Ji et Hayashi, Yoshitsugu. *Assessment of private car stock and its environmental impacts in China from 2000 to 2020.* Transportation research Part D, 13:471-478, 2008. 4, 7.
- Haseli, Y., Naterer, G. F. et Dincer, I. *Comparative assessment of greenhouse gas mitigation of hydrogen passenger trains.* International Journal of Hydrogen Energy, 33(7):1788-1796, 2008. 17, 18.
- Hensher, D. A. et Button, K. J. *Handbook of Transport and Environment.* Number 4 in Handbooks in Transport. Elsevier, 2003. 2.
- Hu, Xiaojun *et al. Energy for sustainable road transportation in China: Challenges, initiatives and policy implications.* Energy, 2009. 6, 7.
- Institution of Mechanical Engineers. *Climate change adapting to the inevitable?* Technical report, Institution of Mechanical Engineers, 2008. 30.

- Jaroszweski, David, Chapman, Lee et Petts, Judith. *Assessing the potential impact of climate change on transportation: The need for an interdisciplinary approach*. Journal of Transport Geography, 2009. 30, 31.
- Jonkeren, Olaf, Jourquin, Bart et Rietveld, Piet. *Modal-split effects of climate change: The effect of low water levels on the competitive position of inland waterway transport in the river Rhine area*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2009. 28, 31.
- Kahn Ribeiro, S. *et al. Transport and its infrastructure*, chap. 5, p. 323-386. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY (États-Unis), 2007. 3.
- Koetze, Mark J. et Rietveld, Piet. *The impact of climate change and weather on transport: an overview of empirical findings*. Transportation Research Part D, 14:205-221, 2009. 2, 26, 30.
- Krzyzanowski, Daniel A., Kypreos, Socrates et Barreto, Leonardo. *Supporting hydrogen based transportation: case studies with global MARKAL model*. Computational Management Science, 5(3), 2008. 10, 11, 24.
- Labriet, Maryse et Loulou, Richard. *ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model part i: Model structure*. Computational Management Science, 5(1-2):7-40, 2008. 10, 24.
- Labriet, Maryse, Loulou, Richard et Kanudia, Amit. *Global Energy and CO2 emission scenarios: analysis with a 15-region world MARKAL model*, chap. 8. Springer, 2005. 8, 9, 24.
- Lemmen, D. S. et Warren, F. J., éd. *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques: perspective canadienne*. Gouvernement du Canada, Ottawa, ON, 2004. 26, 31.
- Liao, Chun-Hsiung, Tseng, Po-Hsing et Lu, Chin-Shan. *Comparing carbon dioxide emissions of trucking and intermodal container transport in Taiwan*. Transportation research Part D, 14:493-496, 2009. 22, 24.
- Lindgren, Johan, Jonsson, Daniel K. et Carlsson-Kanyama, Annika. *Climate adaptation of railways: lessons from Sweden*. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 9(2):164-181, 2009. 29, 31.
- Liska, Adam J. et Cassman, Kenneth G. *Towards standardization of life-cycle metrics for biofuels: Greenhouse gas emissions mitigation and net energy yield*. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2(3):187-203, 2008. 7, 8.
- Lutsey, Nicholas et Sperling, Daniel. *Greenhouse gas mitigation supply curve for the United States for transport versus other sectors*. Transportation research Part D, 14:222-229, 2009. 19, 24.
- McCollum, David et Yang, Christopher. *Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications*. Energy Policy, In Press, Corrected Proof:-, 2009. 23.
- Molua, Ernest L. *Accommodation of climate change in coastal areas of Cameroon: selection of household-level protection options*. Mitigation and Adaptation Strategies for Global change, 2009. 31.
- National Research Council. *Potential impacts of climate change on U.S. Transportation*. Transportation Research Board, 2008. 25, 27, 31.
- Noreland, Jonas. *Inland freight and passenger transport in the EU-27 up to 2007*. Technical report, Eurostat, 2009. 4.

- O'Donnell, Brendon *et al.* *The relative contribution of transportation to supply chain greenhouse gas emissions: a case study of American wheat.* Transportation research Part D, 14: 487-492, 2009. 7, 8.
- Savonis, Michael J., Burkett, Virginia R. et Potter, Joanne R. *Impacts of climate change and variability on transportation systems and infrastructure: Gulf Coast study, part i.* Synthesis and assessment product 4.7, U.S. Climate Change Science Program and the subcommittee on global change research, 2008. 25, 29, 31.
- Schafer, Andreas et Jacoby, Henry D. *Experiments with a hybrid CGE-MARKAL model.* Energy Journal, 27:171-177, 2006. 14, 24.
- Sperling, Daniel et Gordon, Deborah. *Advanced passenger transport technologies.* Annual review of environment and resources, 33:63-84, 2008. 20, 24, 25.
- Stanley, John K., Hensher, David A. et Loader, Chris. *Road transport and climate change: stepping off the greenhouse gas.* Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2009. 22, 24.
- Stern, Nicholas. *The economics of climate change: the Stern review.* Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY (États-Unis), 2006. 4.
- Suarez, Pablo *et al.* *Impacts of flooding and climate change on urban transportation: a system-wide performance assessment of the Boston metro area.* Transportation research Part D, 10:231-244, 2005. 29, 31.
- Wright, Lloyd et Fulton, Lewis. *Climate change mitigation and transport in developing nations.* Transport Reviews, 25(6):691-717, 2005. 23.
- Yan, Xiaoyu et Crookes, Roy J. *Reduction potentials of energy demand and GHG emissions in China's road transport sector.* Energy Policy, 37:658-668, 2009. 14, 16, 24.
- Yang, Christopher *et al.* *Meeting an 80 per cent reduction in greenhouse gas emissions from transportation by 2050: a case study in California.* Transportation research Part D, 14: 147-156, 2009. 19, 20, 21, 23, 24.
-