

La voie étroite du « facteur 4 » dans le secteur des transports : quelles politiques publiques, pour quelles mobilités ?

A 75% reduction in greenhouse gas emissions in the transport sector: the link between public policies and mobility

H.G. Lopez-Ruiz · Y. Crozet

Reçu le 13 avril 2010 ; accepté le 1^{er} octobre 2010
© INRETS et Springer-Verlag France 2011

Résumé Afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, les experts du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) préconisent une division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Cet objectif impose une division par quatre (c'est-à-dire facteur 4) des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés comme la France. Le secteur des transports peut-il se plier à cette exigence ? À l'aide du modèle TILT (Transport Issues in the Long Term), centré sur les relations macro- et micro-économiques du système de transport, ce papier recherche les conditions à réunir pour que soit atteint, en France, le « facteur 4 ». Si les progrès techniques annoncés par les ingénieurs sont au rendez-vous, nous pouvons atteindre un facteur 2. L'autre moitié du chemin doit donc être réalisée par une modification des comportements des individus et des entreprises. Trois familles de scénarios sont proposées pour en illustrer le contenu de ces évolutions. Elles montrent que les estimations de trafic et d'émissions ne disent pas tout. Pour donner un contenu concret aux scénarios, il est nécessaire de cerner précisément les politiques publiques capables de conduire aux inflexions souhaitées et les changements de comportements qu'elles appellent. *Pour citer cette revue : Rech. Transp. Secur. 27 (2011).*

Mots clés Modélisation · Facteur 4 · Gaz à effet de serre · Couplage · Scénarios · Horizon 2050

Abstract Today, numerous works conclude that transport seems to be completely coupled to economic and export/import growth. Therefore, as a direct consequence of economic development, transport sits today as one of the major final energy consumers and as one of the most important

sources of carbon dioxide emissions. Consequently, this situation of continuous increase in transport clearly poses an environmental problem. In this paper, we propose to assess a certain number of possible solutions through scenario building in a backcasting manner using the TILT (Transport Issues in the Long Term) model. In particular, we evaluate three different scenarios that address how technology and different public policies can contribute towards a sharp reduction in CO₂ emissions. Each scenario allows a quick comprehension of the types of results that can be obtained through different policy mixes. In sum, realistic technological hypothesis show that a 50% reduction in emissions, from the 2000 level, is a clear possibility, and that the remaining 25% reduction in emissions is possible through different types of policy mixes. *To cite this journal: Rech. Transp. Secur. 27 (2011).*

Keywords Modeling · Greenhouse gas · Coupling · Scenarios · 2050

Introduction

Avec le Grenelle de l'environnement, la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue en France une priorité nationale. Cette exigence n'est pas nouvelle puisque dès le début des années 2000, était évoqué le « facteur 4 », c'est-à-dire, à l'horizon 2050, la division par quatre des émissions de CO₂, un des principaux gaz à effet de serre. Dans cette perspective, le PREDIT a lancé une recherche prospective afin de définir quels pourraient être les scénarios conduisant, en France, pour le secteur des transports, à une division par quatre des émissions de CO₂. Cet objectif vise bien sûr à répondre aux menaces que fait peser sur le climat une concentration accrue de ce gaz dans la haute atmosphère. Mais il s'agit également, en limitant le recours à l'énergie fossile, de nous protéger de notre dépendance au pétrole. Ce papier présente les principaux résultats de cette recherche [1] dont

H.G. Lopez-Ruiz (✉) · Y. Crozet
Laboratoire d'économie des transports (UMR CNRS no 5593),
14, avenue Berthelot, F-69363 Lyon cedex 07, France
e-mail : hector.lopez-ruiz@let.ish-lyon.cnrs.fr

l'objectif n'est pas de prévoir précisément ce que seront les émissions de CO₂ en 2050, ce serait présomptueux. Son principal intérêt ne réside pas dans les résultats obtenus, mais dans la méthode qui vise à comprendre quelles pourraient être dans les comportements, les inflexions, voire les ruptures à même de modifier les évolutions de la mobilité des personnes et des marchandises. Des changements qui ne tomberaient pas du ciel, mais seraient liés à des politiques publiques qui sont également précisées.

Il est nécessaire de parler d'inflexion, voire de rupture, car si nous commençons par regarder non pas l'avenir, mais le passé, nous constatons que les dernières décennies ont été marquées par une progression constante de la mobilité des personnes et des marchandises. Une mobilité très dépendante du pétrole, qui a transformé le secteur des transports en mauvais élève de la classe. Alors que, depuis 30 ans, l'industrie a réduit significativement sa consommation d'énergie fossile et ses émissions de CO₂, le secteur des transports continue de les faire croître, notamment du fait des déplacements à longue distance de personnes (automobiles, avion) et de marchandises (camion, bateau, avion). Nous nous sommes donc intéressés à la notion de couplage. Pour cela nous avons développé un modèle capable d'expliquer les tendances passées et d'indiquer ce que pourrait être une évolution tendancielle fondée sur le couplage entre mobilité globale, l'activité d'une économie (représenté par le produit intérieur brut [PIB] dans ce papier), l'intensité énergétique et le contenu carbone des carburants [2].

- Ce modèle, ses relations macroéconomiques et les hypothèses microéconomiques qui les fondent, est présenté dans la première partie. Les progrès techniques y jouent un rôle clé, mais comme notre prospective s'intéresse aux comportements, les améliorations potentielles en matière d'énergie et de motorisation sont des paramètres définis de façon exogène par ce que nous promettent les spécialistes. Par contre, les comportements de mobilité, issus de déterminants microéconomiques sont endogènes, tout comme le sont les données macroéconomiques et les niveaux de trafic, totaux et par mode. Dans cette articulation entre déterminants macro- et microéconomiques, deux notions clés apparaissent, l'élasticité distance/PIB et l'élasticité vitesse/PIB ;
- la seconde partie cherche ensuite, dans une logique de *backcasting* [3], à définir ce que pourraient être les scénarios de mobilité à l'horizon 2050. Après avoir défini le scénario tendanciel, nous présentons les évolutions des comportements nécessaires à l'obtention du facteur 4. Deux autres scénarios sont alors proposés qui, pour se rapprocher du facteur 4, ou l'atteindre, supposent que soient mises en place des politiques publiques volontaristes, articulées à des changements de modes de vie.

Le lecteur appréciera le caractère plus ou moins réaliste des scénarios, mais nous l'invitons surtout à s'interroger sur les mécanismes mis en lumière, qui interpellent les préférences collectives et individuelles.

TILT (Transport Issues in the Long Term) : un modèle pour évaluer les tendances de long terme et comprendre leurs fondements

La mobilité des personnes et des marchandises est étroitement corrélée à la croissance économique. C'est ainsi qu'est née la notion de couplage (*coupling*) entre mobilité et niveau de vie [4]. Dans une perspective de modélisation, le couplage se traduit par une élasticité qui nous indique comment le trafic évolue quand le PIB varie. Pour les voyageurs, cette élasticité a été, dans les décennies passées, proche de la valeur 1, ce qui donne un parfait couplage entre croissance économique et mobilité [5,6]. La relation est encore plus nette pour les marchandises où l'élasticité entre les trafics (en tonnes-kilomètres) et le PIB a par exemple été supérieure à la valeur 1 au sein de l'Union Européenne [7]. La question qui se pose au modélisateur est donc de savoir si cette relation va changer dans les années à venir et dans quelles proportions. Le modèle TILT a donc fait de cette élasticité sa variable clé, au sens propre du mot variable puisque nous envisageons pour elle différentes valeurs. Mais TILT ne se réduit pas à une relation entre trafics et PIB. Si, dans une première étape, notre travail de prospective se fonde sur la relation entre croissance économique et transport, une deuxième étape se penche sur les formes évolutives de mobilités qui en découlent. Pour cela, sont articulés des mécanismes macro- et microéconomiques. Les comportements des acteurs deviennent alors cruciaux pour esquisser dans une troisième étape ce que pourraient être les politiques publiques.

Architecture d'ensemble de TILT

Le modèle TILT n'est pas destiné à faire des prévisions de court terme. Il s'inscrit dans une démarche prospective de long terme (horizon 2050) et dans une logique de *backcasting* [8–10]. Rappelons que le *backcasting* consiste à rechercher les changements nécessaires aujourd'hui, ou dans les années à venir, pour atteindre certains objectifs à un horizon donné. Pour nous, l'objectif est la division par quatre des émissions de CO₂ entre 2000 et 2050. Nous devons donc mettre en lumière les variables clés, quantitatives et qualitatives, que nous pourrions mobiliser afin de proposer des scénarios contrastés présentant les évolutions possibles de la mobilité et de quelques variables clés de l'économie, en relation avec différents types de politiques publiques

Pour cela, nous avons cherché à prendre en compte les caractéristiques du système de transports et l'éventail des choix permettant aux personnes et aux entreprises de satisfaire leurs besoins en matière de mobilité. Comme le montre la Figure 1 (que nous commentons en commençant en haut à droite puis en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre) [11], les déterminants microéconomiques sont donc relativement classiques. Les individus, comme les entreprises, cherchent à maximiser leur utilité en minimisant leurs coûts de transport. Ils le font en tenant compte des contraintes propres aux systèmes de transport, notamment les infrastructures disponibles et la réglementation, lesquelles dépendent directement des politiques publiques. Les potentialités du système de transport impactent donc les choix en matière de localisation géographique, des ménages comme des firmes [12].

Le déploiement des politiques publiques se décline dans TILT en diverses hypothèses concernant les conditions de la mobilité des personnes et des marchandises, où la vitesse moyenne pour les différents modes joue un rôle central. C'est ainsi que l'on peut expliquer les changements de structure de la demande de mobilité. Si, en France, mais aussi dans les pays les plus développés d'Europe, nous observons

depuis le début des années 2000 une stagnation du trafic automobile, c'est parce que la route n'est pas capable de répondre à une préférence accrue pour la vitesse. Au contraire, l'avion et le TGV se développent parce qu'ils répondent à une élasticité vitesse/PIB que nous avons dans le scénario tendanciel évalué à 0,33 pour les voyageurs. Ce choix n'est pas anodin, il anticipe un mécanisme de saturation progressive des gains de vitesse [5]. Schäfer lui-même montre que pour que la mobilité continue à progresser selon les tendances passées (élasticité de valeur 1), il faudrait que dans quelques décennies la vitesse moyenne de déplacement quotidienne dépasse les 600 km/h. Notons qu'aujourd'hui, pour un déplacement aérien aux États-Unis, la vitesse moyenne porte-à-porte dépasse de peu les 200 km/h.

Il n'y a donc pas que l'accroissement des vitesses qui jouent un rôle dans la hausse tendancielle de la mobilité. En outre, dans un monde où les unités de production sont de plus en plus grandes, recherchant la baisse des coûts unitaires grâce aux économies d'échelle, l'allongement des distances parcourues par les marchandises peut aussi se faire, dans certains segments, sans amélioration sensible de la vitesse. Le cas du transport maritime de conteneurs est ici emblématique. Ce qui a le plus favorisé son développement

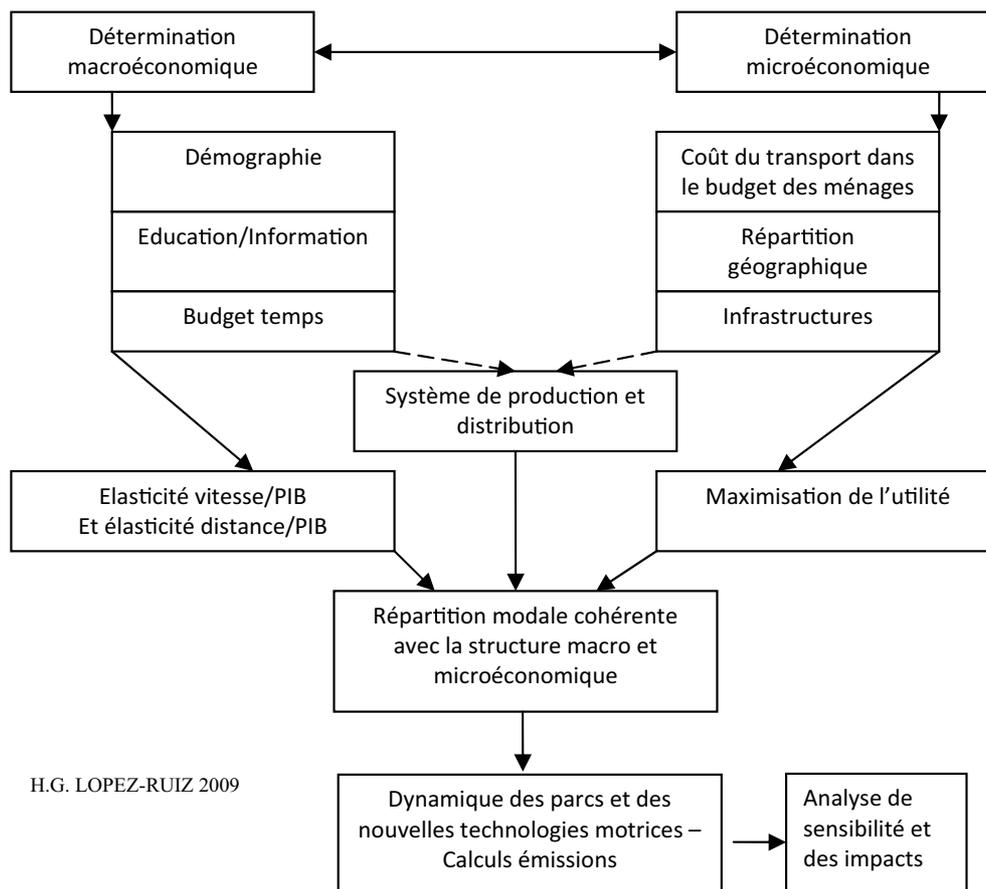


Fig. 1 Architecture générale du modèle TILT [11]

n'est pas la vitesse des navires, mais la capacité de la chaîne logistique qui entoure le transport maritime à assurer une massification des flux favorables à une diffusion globale de la baisse des coûts unitaires de production [13,14]. Nous avons donc envisagé dans les scénarios des situations où, pour les marchandises, nous pourrions avoir une élasticité vitesse/PIB nulle, mais une élasticité distance/PIB positive.

L'élasticité vitesse/PIB est donc cruciale, car c'est elle qui fait le lien entre déterminants macro- et microéconomiques. Car, si l'élasticité entre trafics et PIB est fondée sur des facteurs microéconomiques explicités par l'optimisation des comportements [11], elle est aussi une « loi d'airain » du couplage [15] à l'échelle macroéconomique. TILT en présente les déterminants structurels, ceux qui jouent un rôle clé dans l'évolution du PIB : la démographie, mais aussi le degré de qualification de la population et la façon dont cette dernière utilise son temps entre les diverses activités possibles. Au total, déterminants macro- et microéconomiques convergent pour orienter la demande de mobilité vers une répartition modale cohérente avec les politiques publiques. À ces données de trafic, nous pouvons dès lors associer des estimations des émissions de CO₂ compte tenu des hypothèses faites par ailleurs sur l'évolution des parcs et des technologies disponibles (Encadré 1).

Module « déterminants macroéconomiques »

Le module macroéconomique de TILT est fondé sur les développements antérieurs réalisés par le consortium VLEEM (Very Long Term Energy Modelling, 2002). Destiné à l'origine à estimer les évolutions possibles de la consommation d'énergie pour l'ensemble des activités humaines, VLEEM combine deux choix méthodologiques imposés par l'horizon temporel de long, voire de très long terme (VLEEM s'intéresse aussi à l'horizon 2100 !) :

- une approche *backcasting* ;
- une refondation des structures de modélisation « énergie-environnement ».

Le fondement théorique sur lequel repose le module BASES de VLEEM [16] est que le développement économique à très long terme provient, en grande partie, du niveau de qualification de la main-d'œuvre. Dans la ligne de la notion de croissance endogène [17], un rôle clé est donné au capital humain. Ainsi, le module BASES suppose que les déterminants de la production, à très long terme, sont la population active et son niveau de formation. Cette main-d'œuvre disponible résulte de plusieurs facteurs :

- le premier est quantitatif, il dépend d'hypothèses de fécondité moyenne, mais aussi de l'évolution de la structure par âge. Le nombre et la taille des ménages sont aussi pris en compte. À l'horizon 2050, il est envisagé pour

la France métropolitaine une population de 67 millions d'habitants. L'âge moyen est plus élevé qu'en 2000 et la taille des ménages est plus réduite, mais leur nombre est plus élevé ;

- facteur qualitatif ensuite, la quantité et la valeur de la richesse produite dépendent aussi de la qualification de la main-d'œuvre qui influence directement la productivité de l'économie. En outre, le module BASES suppose un phénomène cumulatif d'enrichissement, car la quantité de capital disponible augmente avec la qualification de la main-d'œuvre.

Une fois déterminées, dans une logique démo-économique, la masse et les caractéristiques de la population active, on en déduit la productivité et finalement le PIB. C'est là que TILT s'enrichit par rapport au modèle VLEEM en se penchant de façon détaillée sur les mobilités associées au niveau de vie atteint, qui sont en rapport au modèle de développement économique du pays. Car, si globalement, l'hypothèse faite sur la relation entre distance et PIB¹ donne une indication sur le volume global de trafic, il est nécessaire ensuite de répartir ce volume pour différents modes et différents motifs, en restant, par ailleurs, cohérents avec l'hypothèse faite sur l'élasticité vitesse/PIB.

À titre d'illustration, prenons le cas de la mobilité des personnes pour lesquelles la logique de TILT consiste en une succession d'ajustements et d'itérations pour mettre en cohérence, avec le trafic global, les trafics de passagers pour les différents modes, sous contrainte, hypothèse centrale, du budget temps total consacré en moyenne aux transports sur les différentes échelles géographiques. Il ne s'agit pas ici d'une optimisation microéconomique, mais d'un ajustement global entre temps total consacré aux transports, parts modales et vitesses commerciales moyennes.

Ensuite, TILT définit les besoins de services de mobilité urbaine et régionale, qui sont très liés à l'urbanisation et aux infrastructures (deux éléments qui font l'objet d'hypothèses exogènes sur les possibilités de leur extension). Ces besoins sont exprimés en km/an par tête suivant un calcul qui fait intervenir la vitesse (aussi une hypothèse exogène) des modes sur les différents espaces.

Les besoins de mobilité de longue et très longue distance s'obtiennent par déduction : besoins globaux de mobilité (leur évolution dépend de l'élasticité vitesse/PIB et varie selon chaque scénario) moins les besoins de mobilité urbaine et régionale. La vitesse moyenne de ces déplacements sur longue et très longue distance doit rester cohérente avec :

¹ En France, nous avons observé une évolution de la vitesse du système de transport qui est couplée à l'évolution du PIB. En conséquence, à temps de transport constant, la croissance des vitesses explique l'allongement des distances de transport cf. travaux de V. Bagard [18].

- d'une part, les besoins globaux de mobilité et la vitesse moyenne des déplacements, liée au PIB par une élasticité fixe considérée comme une caractéristique du scénario retenu ;
- d'autre part, les besoins de mobilité urbaine et régionale et les vitesses afférentes.

Une fois définis les volumes globaux de trafic par motif, TILT s'intéresse à la répartition modale. Là aussi, il est procédé par ajustement global à partir des services de mobilité que peut ou que ne peut pas offrir le transport routier.

Le recours à la route dans la mobilité urbaine et régionale dépend étroitement des infrastructures en place et des vitesses de déplacement sur ces infrastructures. Ces éléments, très liés aux politiques publiques, sont considérés de façon exogène, comme indicateurs des politiques menées.

Le recours à la voiture pour la mobilité de longue distance doit donc être mis en cohérence avec d'une part l'équipement et l'usage moyen global de la voiture (kilomètre par an par voiture), d'autre part son usage urbain et régional. Dans le scénario tendanciel, on considère que :

- l'équipement automobile se poursuivra jusqu'à atteindre un niveau de saturation lié aux besoins de mobilité routière en rapport à la population en âge² et en état de conduire ;
- l'usage annuel moyen de la voiture est borné (en kilomètre par an par voiture) à un maximum, conformément aux tendances récentes à la baisse des kilomètres moyens annuels parcourus par chaque automobile en France.

Le processus de mise en cohérence consiste :

- à déduire, du nombre total d'heures passées dans les voitures particulières (VP) celles passées en urbain et en déplacements régionaux ;
- à calculer le nombre global d'heures passées en VP dans les services de déplacement de longue distance.

Une fois déterminés les vitesses et les usages de la voiture, il reste ensuite à mettre en cohérence les évolutions relatives aux services de mobilité des autres modes par rapport :

- aux besoins de mobilité de longue et très longue distance ;
- à la vitesse moyenne de déplacement et les vitesses spécifiques de chaque mode ;
- à la contribution maximale de la voiture à ces besoins de mobilité.

Cette mise en cohérence débouche sur une structure possible de la mobilité par mode déterminée par itérations successives pour calculer le volume global de trafic et sa répartition par mode et par type de service. On dispose ainsi d'une vision détaillée de la mobilité associée à un

² Les différences de mobilité selon les différentes classes d'âge ne sont pas prises en compte dans cet indicateur agrégé.

certain niveau de PIB et à certaines hypothèses concernant l'élasticité vitesse/PIB. À ce stade, ces deux élasticités restent toutefois des variables exogènes que le module microéconomique s'efforce d'endogénéiser.

Module « déterminants microéconomiques »

Le module « déterminants microéconomiques » s'intéresse aux arbitrages effectués par les acteurs économiques, ménages et firmes. Pour ce module [11], nous sommes partis des résultats de trafic fournis par le module macroéconomique pour en rechercher les fondements microéconomiques. Pour cela, nous avons considéré les transports comme une suite d'arbitrages réalisés dans le cadre du budget des ménages consacré au transport, en relation aux besoins en mobilité nécessaires pour réaliser leurs activités.

Ainsi, nous avons adopté l'hypothèse selon laquelle les différents zones de service du module macroéconomique correspondaient à différentes échelles géographiques, c'est-à-dire à des espaces physiques définis, parcourus par des infrastructures dotées de certaines caractéristiques. Celles-ci ont à la fois un coût et une réglementation d'utilisation qui influent sur le coût du transport, ainsi que sur la vitesse sur le réseau. Un coût et une vitesse que l'on peut modéliser. Nous l'avons fait en nous inspirant des « algorithmes de fournis » [20] que nous avons adaptés à notre logique de prospective [11]. L'intérêt de cette modélisation est de bien mettre en valeur les critères de choix des individus. Mais, elle a aussi fait apparaître les influences réciproques entre transport de marchandises et transport de passagers lorsque les deux flux utilisent les mêmes infrastructures.

L'arbitrage opéré par les agents économiques consiste d'abord à comparer le coût du transport entre les différents modes et itinéraires pour choisir le plus adapté. Ce coût est ensuite comparé aux opportunités rendues accessibles par le déplacement. Ainsi, les trafics pour une origine destination ij dépendent de la valeur relative du couple coût du transport–opportunités, le coût du transport variant avec le « taux de retard » [21] constaté sur une infrastructure du fait de son degré plus ou moins élevé de congestion.

Les variables clés de la table de décision sont donc les suivantes :

$$a_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l=1}^{N_i} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad \forall j \in N_i$$

avec

(2)(3)

$$\eta_{ij} = \frac{\text{opportunité}}{\text{coût du transport}} \text{ et } \tau_{ij}(t) = \text{taux de retard.}$$

Ainsi, l'utilité du déplacement sera déterminée par la relation existant entre l'opportunité et les coûts comparés des différents modes, lesquels prennent en compte les niveaux de service propres à chaque mode. L'opportunité de réaliser/

consommer telle ou telle activité/service/bien dépend donc de l'accessibilité, laquelle est directement liée au coût généralisé de transport. Dans cette logique, que ce soit pour se nourrir, pour aller travailler, pour aller visiter un musée ou transporter une tonne de Paris à Lyon, chaque déplacement associe ce que nous pourrions appeler un coût d'opportunité de l'activité à un coût du transport. Les choix des acteurs économiques sont donc liés à la distance, mais aussi au temps, car il faut prendre en compte la congestion sur le réseau dans un espace donné, les vitesses, mais aussi le prix du carburant, les éventuelles taxes, etc. La détermination de tous ces éléments est propre à chaque scénario, et elle se fait dans une logique *backcasting*. En conséquence, les variables du module microéconomique sont le résultat d'une mise en cohérence avec les résultats du module macroéconomique en faisant l'hypothèse que α et β ne changent pas au cours de la période.

C'est sur la base de ces comparaisons entre opportunités et coûts que se déterminent les choix microéconomiques qui sont au principe de l'élasticité vitesse/PIB, qui n'est, dans le module macroéconomique, que l'agrégation en une valeur globale d'une infinité de comportements microéconomiques d'optimisation. Les choix qu'ils révèlent se font également sous la contrainte des politiques publiques (encadré 2). Ainsi, une hausse des coûts, consécutive par exemple à une taxe, ou à une hausse des prix du pétrole, va se traduire par une moindre mobilité, car certains déplacements ne seront plus opportuns. Il y a donc là un premier levier, classique, des politiques publiques, l'action sur les coûts relatifs. Mais, dans les scénarios que nous allons présenter, un autre levier est envisageable, celui qui modifie la définition même des opportunités. Les politiques publiques, mais aussi des phénomènes de saturation ou de modification des préférences individuelles peuvent alors conduire à une appréciation différente des opportunités. Une appréciation qui pourrait nous faire passer d'une logique universelle de couplage à certaines formes de découplage entre croissance économique et mobilité.

TILT : du scénario tendanciel à des scénarios alternatifs mettant en cohérence politiques publiques et changements de comportements

Dans le rapport de recherche rendu en 2008 par le groupe-ment LET-ENERDATA, trois familles de scénarios ont été définies, auxquelles étaient associées des politiques publiques types conduisant à une mobilité permettant plus ou moins bien de se rapprocher du « facteur 4 » :

- la première famille de scénarios a été nommée « Pégase ». Il s'agit d'un scénario où la mobilité continue à croître du fait d'une élasticité vitesse/PIB qui se fixe respectivement

Encadré 1. Hypothèses sur les technologies et les parcs

Le module d'émissions a pour objet de calculer à très long terme, à partir des résultats du modèle TILT, la consommation de carburant du secteur transports ainsi que les émissions qui y sont associées. Le modèle d'émissions permet donc de traduire les passagers-kilomètres et les tonnes-kilomètres en tonnes de CO₂.

Le modèle d'émissions est capable de :

- modéliser l'évolution du parc automobile (avec un modèle de dynamique des parcs fondé sur les travaux de C. Gallez [19] et l'introduction des innovations techniques dans le parc ;
- ventiler les trafics générés par TILT pour les différents services de mobilité selon les innovations techniques utilisées ;
- calculer les consommations énergétiques ainsi que les émissions à partir des descriptifs techniques des différentes innovations techniques.

En intégrant les différents modules et TILT, il devient possible de quantifier les conséquences de la mobilité sur l'environnement tout en détaillant la structure des déplacements selon l'innovation technique utilisée pour se déplacer, la dynamique du parc, la nature du déplacement et l'âge des véhicules. Pour l'ensemble des scénarios, plusieurs sentiers technologiques ont été envisagés avec différentes options au niveau de la motorisation, des années d'entrée sur le marché et de sa capacité de pénétration.

Les émissions liées aux configurations des scénarios qui seront présentées dans ce papier ont été calculées sur la base d'un sentier technologique où des hybrides biénergie avec une autonomie de batterie de 100 km apparaissent sur le marché à partir de 2010 et sont largement généralisés en 2050 et que les voitures électriques le font à partir de 2020 (avec une moyenne — toute distance confondue — de 46 gCO₂ par véhicule km pour les passagers et de 240 gCO₂ par véhicule km pour les marchandises¹).

Concernant les avions, nous envisageons l'hypothèse, que d'ici 2050, la réduction de leur consommation d'énergie équivalra à une réduction de 35 % par rapport à la consommation moyenne en 2000. Par ailleurs, nous faisons l'hypothèse d'une utilisation accrue des biocarburants de deuxième génération. Au total, 35 % du carburant consommé en 2050 est du biocarburant

Le calcul des émissions est *well-to-wheel*, et nous considérons qu'en 2050, l'électricité est d'origine nucléaire. Cette hypothèse est, bien sûr, questionnable, mais, comme nous le montrerons dans les scénarios, elle permet de mieux appréhender le rôle des technologies dans l'obtention du facteur 4.

¹ Toutes les valeurs de proviennent de la base de données des émissions ENERDATA.

Encadré 2. Les politiques publiques et leurs impacts

Le modèle TILT a été enrichi [11,22] d'un module qui prend en compte les politiques publiques. Cela se fait d'abord par la définition de quatre paquets de politiques publiques (« *policy packages* », VIBAT, 2006). Ces quatre paquets sont les suivants :

- politiques orientées vers les styles de vie qui englobent des technologies et changements dans les comportements visant à améliorer les activités de transport ;
- politiques orientées vers les marchés, qui font référence par exemple à la tarification des transports ou même aux permis négociables ;
- politiques orientées vers la réglementation, qui font appel à toute mesure qui puisse améliorer la gestion du trafic des passagers et/ou marchandises ;
- planification de nouvelles infrastructures publiques/services, ce paquet réunit toute mesure visant à faire face aux besoins particuliers de chaque scénario dans la matière.

Sont ensuite estimés les impacts de ces politiques publiques par le biais d'une analyse de sensibilité couplée à une analyse multicritères. Cette structure permet à TILT de calculer quel est l'impact de chaque paquet sur les émissions de gaz à effet de serre pour chaque scénario. Ce module permet donc de proposer des paquets quantifiés et cohérents avec la vision de chaque scénario. La quantification de l'impact de chaque politique publique sur le système est également calculée en observant les effets sur l'économie des investissements nécessaires au maintien d'un certain niveau de mobilité. En outre, les changements d'activité de chaque secteur du transport sont également pris en compte et quantifiés. L'ensemble de cette analyse se fait sur la base d'une analyse input-output (I-O) de Leontief [23]. Un double objectif est poursuivi : chiffrer les effets des sentiers de politiques publiques qui caractériseront chaque famille de scénarios et analyser la viabilité des politiques d'un point de vue économique.

Ce module complémentaire de TILT permet d'examiner les liens existant entre les politiques publiques, le transport et l'économie. De cette manière, nous sommes en mesure, dans les scénarios, d'analyser différentes combinaisons de politiques publiques (*policy mix*) en quantifiant les effets par zone, par mode et par secteur pour l'ensemble du système des transports.

à 0,3 pour les voyageurs et 0,6³ pour les marchandises (à la fois pour le fret intérieur et l'international) ;

- la deuxième famille de scénarios s'intéresse à la rareté croissante du temps et s'intitule de ce fait Chronos. La mobilité continue à progresser, mais moins vite que dans Pégase, car l'élasticité vitesse/PIB devient nulle

pour les voyageurs ainsi que pour les marchandises (mais elle reste à 0,3 pour le fret international) ;

- la troisième famille de scénarios fait l'hypothèse que se développe un peu partout une préférence pour la proximité qui nous a poussés à lui donner le nom de Hestia. Ce retour en force de la proximité se concrétise par une élasticité vitesse/PIB qui devient nulle pour les voyageurs et les marchandises.

En nous polarisant sur les valeurs clés, celle des élasticités, nous donnons une première indication sur les grandes tendances des scénarios, mais nous devons aller plus loin. D'une part en présentant les résultats qui en découlent en termes de trafic et d'émissions de CO₂, d'autre part en approfondissant le lien entre politiques publiques et comportements individuels. Quelles sont les politiques publiques les plus adaptées à chaque famille de scénarios ? Pour répondre à cette question, nous explorerons les effets des politiques publiques tout en prenant en compte les investissements et les moyens à mettre en œuvre afin d'atteindre l'objectif. Ainsi, en introduisant les concepts de demande de transport et d'utilisation d'infrastructures (au niveau des décisions microéconomiques) dans une modélisation *backcasting* macroéconomique, nous déterminerons quels pourraient être les effets des différentes politiques économiques sur les comportements et leurs impacts sur les trafics.

Pégase : le scénario tendanciel

Le scénario Pégase suppose que l'évolution du système de transports est tendancielle et conforme aux niveaux de trafics du scénario intermédiaire du CGPC de 2006⁴ [24]. Dans ce scénario nous envisageons une poursuite de la mobilité, accompagnée d'une continuité dans la déconcentration spatiale des activités productives sur le territoire français et européen. Aussi, les distances moyennes parcourues par les passagers et les marchandises continuent à augmenter.

Pour absorber un volume de mobilité qui atteint en 2050 un niveau de 40 % supérieur au niveau de 2000, il est nécessaire de développer les infrastructures de transport et d'en optimiser l'usage. Mais, il est aussi nécessaire de rendre la mobilité moins agressive pour l'environnement. Une réglementation adaptée doit donc être mise en place. Cependant, étant donné l'absence de changement important des modes de vie dans ce scénario, la protection de l'environnement passe essentiellement par le développement des nouvelles technologies et des infrastructures de transport collectif nécessaires à une mobilité qui demeure couplée à la croissance économique. Dans ce sens, la croissance tendancielle

³ Ce sont les élasticités inhérentes au scénario central du CGPC, utilisé comme référence

⁴ Qui calcule un trafic intérieur de passagers de 326 milliards de passagers-kilomètres et un trafic intérieur des marchandises de 150 milliards de tonnes-kilomètres en 2050.

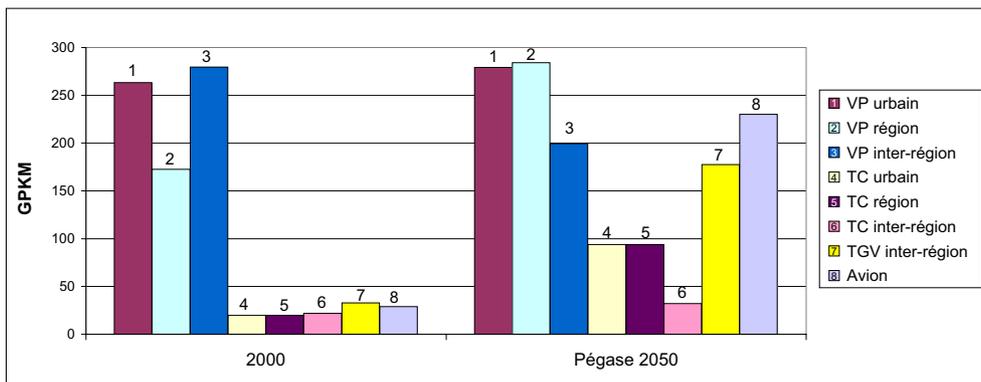


Fig. 2 Scénario tendanciel, les trafics par type-passagers [22]

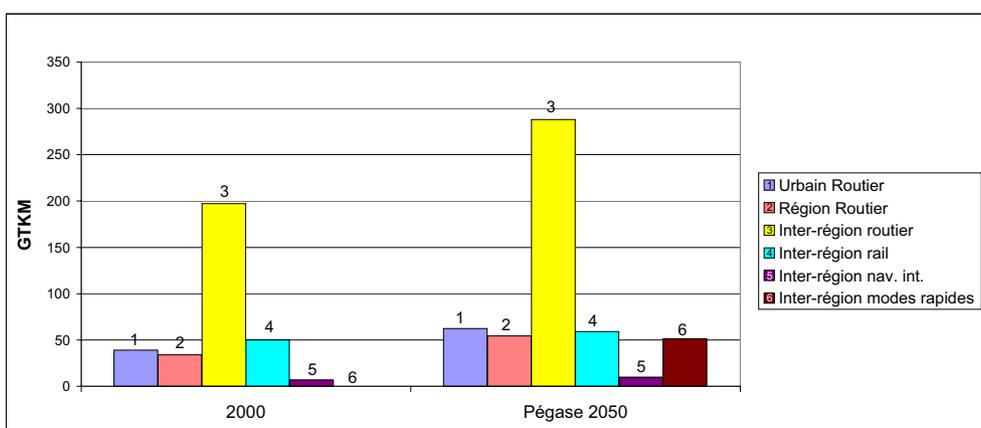


Fig. 3 Scénario tendanciel, les trafics par type-marchandises [22]

des besoins en matière de mobilité requiert une croissance tendancielle de la capacité des infrastructures. Elle exige également un effort très important en matière de nouvelles technologies et de réglementation environnementale concernant la mobilité des personnes et des marchandises.

Pour modéliser la situation de Pégase, il existe une variété de combinaisons possibles⁵ (d’où la notion de « familles de scénarios ») entre les vitesses unitaires par mode, l’utilisation des infrastructures et le poids de chaque mode dans le trafic total. Nous avons choisi une combinaison qui tend à minimiser les nécessaires inflexions structurelles sur les répartitions modales (par rapport aux projections tendancielles du CGPC, 2006) [24]. Nous prenons également en compte les évolutions sur les vitesses par mode, en particulier pour la route, cohérentes avec les élasticités vitesse/PIB. Ainsi, en considérant que la vitesse moyenne sur la route croît légèrement (environ 15 %), la vitesse moyenne du rail et des modes rapides doit faire de même. Cette évolution

n’est envisageable qu’au prix d’un développement relativement soutenu des modes rapides, la vitesse du transport ferroviaire conventionnel étant considérée constante sur l’ensemble de la période.

Comme nous pouvons l’observer dans les Figures 2,3, le trafic qui croît le plus sur la période est le trafic interrégional⁶. C’est le résultat logique de la préférence pour la vitesse et l’accroissement des distances, condition permissive du développement de l’économie de la variété [25]. La hausse tendancielle des revenus conduit à un allongement des distances moyennes parcourues pour les trajets interrégionaux, car l’offre croissante de vitesse ouvre de nouvelles possibilités à la fois pour les passagers et pour les marchandises.

Dans les Figures 4,5, nous observons que les émissions provenant du trafic passagers se réduisent sensiblement — malgré la progression importante du transport aérien — du fait des hypothèses que nous avons faites sur la réduction des trafics automobiles, mais aussi du fait de la généralisation des moteurs hybrides rechargeables, qui pénètrent dans

⁵ Les hypothèses détaillées pour chaque scénario se trouvent en annexe.

⁶ Le détail des résultats pour chaque scénario se trouve en annexe.

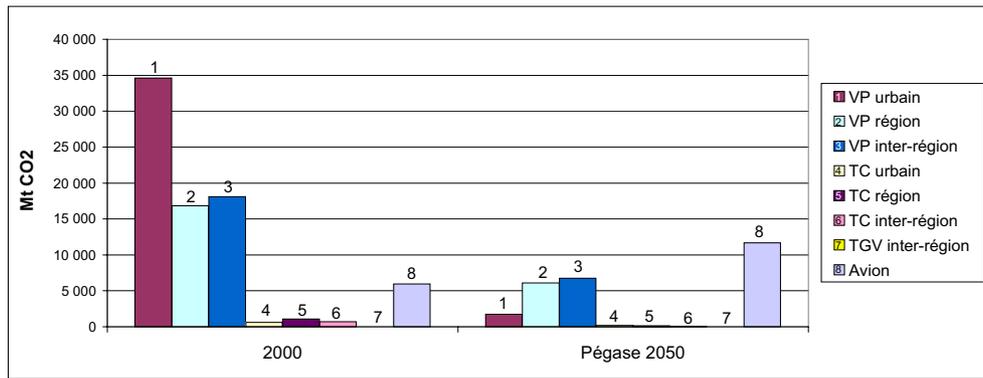


Fig. 4 Scénario tendanciel, les émissions par type-passagers

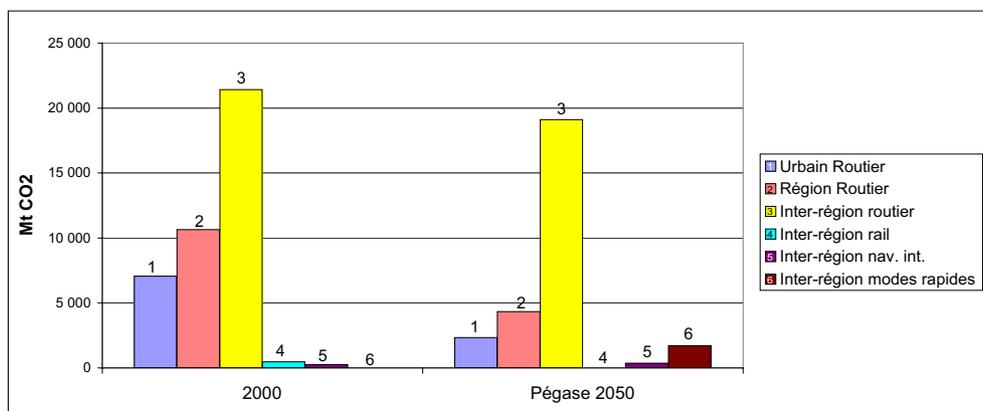


Fig. 5 Scénario tendanciel, les émissions par type-marchandises

le parc dès l'année 2010. Les émissions liées aux scénarios ont été calculées sur la base d'un sentier technologique où des hybrides biénergie, avec une autonomie de batterie de 100 km, pénètrent le marché dès 2010 et sont largement généralisés en 2050. À l'inverse, la réduction des émissions du trafic fret est beaucoup plus faible pour deux raisons : le maintien d'un important trafic routier et l'impossibilité de généraliser la motorisation hybride sur les camions pour les longues distances.

Pégase est un scénario gourmand en investissements tant en infrastructures ferroviaires que routières. Globalement,

TILT évalue le seul besoin d'investissements à près de 2 000 milliards d'euros — courants — sur une période de 50 ans. La plus grande partie de cette somme est nécessaire pour maintenir les vitesses dans le secteur routier et pour améliorer les performances du ferroviaire. Une telle somme n'est pas hors d'atteinte, mais elle demande néanmoins de faire croître, en euros courants, les investissements d'environ 3 % par an, avec une croissance du PIB de 1,5 %. Soit, atteindre une moyenne sur la période de 39 milliards par an en partant d'un niveau qui était déjà de 18 milliards par an en 2007 (Tableau 1).

En Mds€	Modes	2050 Pégase	Par année	% du PIB	Année 2007
Investissement	Route	1 043	21	0,70	12
	Fer	747	15	0,50	2
	TU + TCNU	137	3	0,10	2
	Autres	—	—	—	1
	Total	1 927	39	1,40	18

Mds€ : milliards d'euros ; % : pourcentage.

Comme nous pouvons le constater, ne pas opérer de changements importants dans les programmes d'activités des individus et dans le système de production et de distribution des marchandises a pour conséquence que la majeure partie de l'effort de réduction provient des nouvelles technologies (Encadré 1). Le résultat général, résumé dans les Figures 4,5, est que nous parvenons à diviser par deux les émissions. Comme nous nous sommes fixé l'objectif du facteur 4, d'autres scénarios sont nécessaires, introduisant des inflexions, voire des ruptures.

Chronos et Hestia : deux scénarios alternatifs pour s'approcher du facteur 4

Encore une fois, les scénarios ne cherchent pas à prédire l'avenir. Leur objectif est de présenter des évolutions globales cohérentes avec des modifications de comportement, dont le caractère nécessaire est ainsi mis en lumière. Comme nous devons atteindre une réduction des émissions de CO₂ allant au-delà de ce que permettent les seuls progrès techniques, nous allons modifier quelques paramètres clés qui renvoient à des inflexions majeures dans les comportements des individus et des firmes.

Les changements introduits dans les deux nouvelles familles de scénarios concernent les variables suivantes :

- tout d'abord, nous supposons que l'élasticité vitesse/PIB devient nulle. La hausse des distances est donc plus faible. Dans le scénario Chronos, elle provient essentiellement d'un accroissement des budgets temps de transport (BTT) de 20 %, qui offre la possibilité de continuer la fuite en avant vers la hausse des distances parcourues, sans pour autant que la vitesse moyenne augmente. C'est parce que cette fuite en avant de la mobilité est chronophage que cette famille de scénario prend le nom de « Chronos » ;
- le scénario Hestia fait la même hypothèse d'une élasticité vitesse/PIB nulle. Mais, allant plus loin dans la remise en cause des comportements, cela ne s'accompagne pas d'une hausse des BTT. La réduction des vitesses moyennes et le moindre appétit pour la vitesse vont donc limiter fortement la hausse tendancielle des distances, ce qui signifie un recentrage sur des activités de proximité. La même logique de retour relatif à la proximité s'impose pour le fret avec la réduction de l'élasticité tonnes-kilomètres/PIB (0,3 au lieu de 0,6) et de l'élasticité tonnes-kilomètres/commerce extérieur (0,25 au lieu de 1,6).

Chronos : une mobilité accrue au prix d'une hausse du BTT

Dans Chronos, pour les passagers, domine une logique où une hausse du prix de l'utilisation de la voiture (cohérent

avec une taxe carbone d'environ 350 euros par tonne⁷) entraîne une hausse de l'usage des transports en commun (TC). Ce glissement vers les TC modifie le budget des ménages qui réinvestissent les gains issus du passage à un mode relativement moins cher. Une partie sera réinvestie en relocalisation (pour s'approcher des infrastructures de TC), et une autre sera réinvestie en services de transport rapides à longue distance, notamment l'avion.

Pour les marchandises, la logique est relativement semblable, du fait des politiques publiques cherchant à pénaliser la vitesse routière. On obtient une amorce de changement dans les pratiques logistiques, accompagnée d'un report modal vers des modes moins coûteux (à la fois plus lents, mais aussi moins polluants). Ainsi, le système cherche à retrouver un équilibre en jouant sur la répartition modale afin de minimiser les coûts. L'enjeu dans Chronos c'est un arbitrage entre le besoin en vitesse (qui augmente) et les contraintes publiques sur la vitesse (qui doit globalement rester constante) conduisant à utiliser des modes de transport plus propres et à améliorer ainsi l'empreinte CO₂ de l'ensemble du transport de marchandises. L'objectif est donc de faire passer un certain nombre de tonnes sur le rail tout en maintenant une vitesse globale de déplacement des marchandises. Une vitesse accrue du rail est nécessaire puisque la vitesse sur la route stagne quasiment.

Les tonnes en excédent qui basculent sur le rail ne sont compatibles avec la faible vitesse moyenne du rail conventionnel que si une partie croissante bascule sur du rail rapide, ce qui impose que celui-ci propose un meilleur service du point de vue du coût global du transport. Il s'agit d'un point central à souligner. Dans ce type de scénario, d'importants investissements sont nécessaires pour développer le fret ferroviaire. Et des bouleversements profonds sont aussi nécessaires dans l'organisation du secteur. Rappelons que depuis le début des années 2000, le fret ferroviaire a reculé en France de 20 %, passant d'un peu plus de 50 à moins de 40 milliards de tonnes-kilomètres [26], soit l'exact opposé des évolutions souhaitées par tous !

En conséquence, dans Chronos, grâce à l'accroissement espéré de la vitesse moyenne sur le rail, la logique de l'accroissement des distances peut être maintenue pour ce mode. Cet accroissement des distances moyennes de parcours des marchandises est au cœur du développement du rail. Non seulement le rail est relativement de plus en plus rapide par rapport à la route, mais, en plus, cette tendance se renforce avec l'accroissement des distances moyennes (le rail étant un mode rentable sur longue distance). Il n'en va pas de même pour le transport de fret. Malgré le développement du

⁷ Ce qui montre le chemin à parcourir quand on se souvient qu'en France, le projet avorté de taxe carbone avait retenu une valeur de 17 euros par tonne !

fret ferroviaire, la persistance du transport routier de marchandises nous permet au mieux d'espérer un facteur 3. Il est donc nécessaire d'envisager une autre famille de scénarios donnant plus de place à la proximité.

Hestia : la préférence pour la proximité, un changement de paradigme pour la mobilité

Dans cette famille de scénarios, le système économique se transforme lourdement, car les préférences individuelles et collectives changent radicalement. Dans les scénarios Pégase et Chronos, la question du coût total du produit était centrale. La hausse du coût de transport pouvait ne pas remettre en cause la mondialisation de l'économie, car la hausse du coût de transport d'un produit venant de Chine par exemple pouvait être plus que compensée par la baisse des coûts de production dans ce pays [27]. Dans la logique Hestia, ce qui prime est la demande de proximité, tant pour les activités des ménages que pour l'origine des marchandises consommées. Cela pourrait par exemple être lié à un affichage systématique du contenu en CO₂ des différents biens et services proposés à la vente. Avec cette nouvelle donne, les particuliers, comme les entreprises

cherchent à maximiser leur utilité en réduisant les distances parcourues. Les entreprises se rapprochent des lieux d'habitation et les personnes des services de proximité. Ainsi, à l'adaptation du système par le temps de transport (Chronos) pourrait se substituer une adaptation par les distances (Hestia).

En comparant les trafics voyageurs et marchandises sur les Figures 6,7, la répartition des flux dans Hestia ressemble beaucoup à celle de Chronos, en première approximation. La différence se situe au niveau de l'importance de la baisse de la demande de transport en VP sur les trajets régionaux et longue distance, ainsi que dans l'importance de la partie du budget réinvestie dans la relocalisation (du fait notamment des taxes sur le pétrole ou le carbone). Ainsi, Hestia connaît une hausse globale des trafics moins importante que pour Chronos et Pégase, sans remettre en cause le nombre de tonnes consommées ou produites par la France. Dans Hestia, une logique de rapprochement entre en jeu, l'arbitrage se joue non seulement sur les politiques publiques incitant à l'usage de modes plus propres, mais aussi sur l'implantation spatiale des lieux d'habitat ainsi que des activités de production et de consommation.

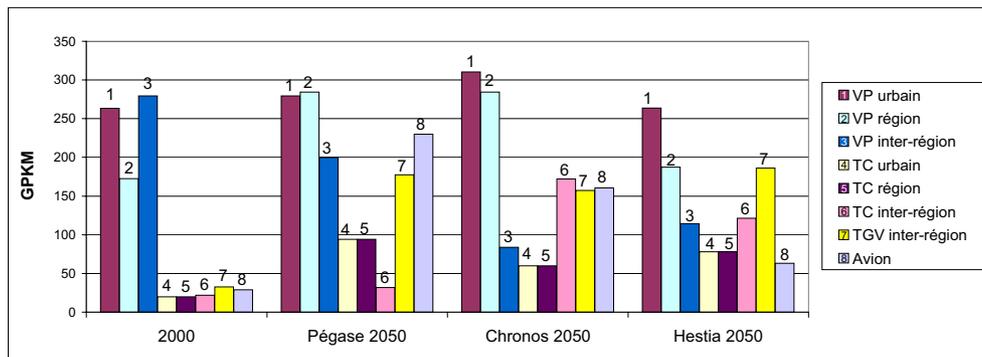


Fig. 6 Mobilité des voyageurs en 2050

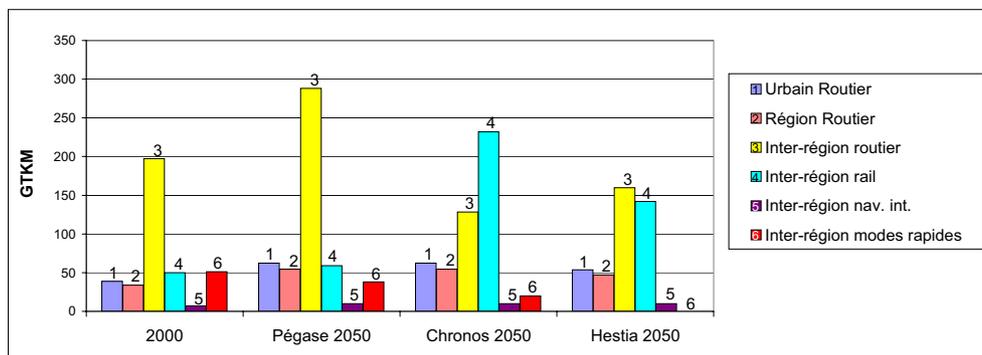


Fig. 7 Mobilité des marchandises en 2050

Tableau 2 Les besoins d'investissement en infrastructures de transport

En Mds€	Modes	2050 Pégase		2050 Chronos		2050 Hestia		Par année	% du PIB	Année 2007	% du PIB
		Mds€	Par année	Mds€	Par année	Mds€	Par année				
Investissement	Route	1 043	21	384	8	140	3	0,1	12	0,9	
	Fer	747	15	1 529	31	992	20	0,7	2	0,2	
	TU + TCNU	137	3	74	1	77	2	0,1	2	0,2	
	Autres	-	-	-	-	-	-	-	1	-	
	Total	1 927	39	1 987	40	1 209	24	0,9	18	1,4	

Mds€ : milliards d'euros ; les valeurs sont en euros courants.
HG. Lopez-Ruiz 2009

Ces niveaux de mobilité sont directement associés à des besoins spécifiques en matière d'investissement en infrastructures. Les besoins d'infrastructure sont résumés dans le Tableau 2, qui fait écho au Tableau 1 en montrant comment doivent s'infléchir les priorités des politiques publiques en matière d'investissement⁸.

Nous remarquons que même si les montants des investissements sont élevés, ils représentent une partie relativement stable du PIB (à l'exception du scénario Hestia). Ce qui change fondamentalement est le transfert des financements de la route vers le rail et les TC.

Les émissions de CO₂ comparées des différents scénarios

Les Figures 6,7 montrent que les émissions provenant du trafic de passagers se réduisent sensiblement dans les trois scénarios, malgré la progression importante du transport aérien. Cela résulte des hypothèses que nous avons faites sur la réduction des trafics automobiles, mais aussi de la généralisation des moteurs hybrides rechargeables qui pénètrent dans le parc dès l'année 2010.

Comme nous pouvons le constater dans Pégase, ne pas opérer de changements importants dans les programmes d'activités des individus et dans le système de production et de distribution des marchandises a pour conséquence que la majeure partie de l'effort de réduction provient des nouvelles technologies. Comme nous l'avons déjà indiqué, Pégase parvient « seulement » à diviser par deux les émissions (Sperling, et al. 2009, entre autres, arrivent à des résultats semblables) [5].

En revanche, dans Chronos et Hestia, les politiques publiques mises en place sont d'une nature différente, et elles visent à modifier le système de transport. Ainsi, dans ces deux scénarios apparaissent les effets des politiques publiques qui visent à avoir un impact direct sur les émissions à travers les leviers de la vitesse, du coût et du temps.

Quelques interrogations sur la crédibilité des scénarios

Cependant, les influences des politiques publiques dans chaque scénario supposent des arbitrages qui méritent d'être élucidés en examinant les liens existants entre les politiques publiques, le transport et l'économie. De cette manière, nous serons en mesure, dans les scénarios, d'analyser différentes combinaisons de politiques publiques (*policy mix*) en quantifiant les effets par zone, par

⁸ Ces calculs ne prennent pas en compte les dépenses de fonctionnement et ne font pas état des bénéfices sociaux liés à la réduction des GES.

mode et par secteur pour l'ensemble du système des transports.

Relation entre les politiques publiques et le transport

La notion de politique publique dans des scénarios prospectifs fait directement référence aux instruments politiques, économiques et/ou organisationnels ayant un impact sur les décisions de mobilité des agents. En effet, la mise en place d'une ou plusieurs politiques publiques aura des effets à la fois sur les moyens (techniques et/ou économiques) dont les ménages disposeront, mais aussi sur l'opportunité que les déplacements peuvent représenter.

Ces changements sur les déterminants de la mobilité auront tendance à modifier la manière dont les individus conçoivent leur programme d'activités et les pousseront à de nouveaux arbitrages d'autant plus complexes qu'ils auront aussi un impact sur le transport de fret (à travers la consommation et l'utilisation des infrastructures). En outre, tous ces changements viendront renforcer une tendance marquée à la différenciation des comportements de mobilité à travers trois facteurs clés de la mobilité : le revenu, la localisation et, de manière inhérente aux deux derniers, les opportunités. La structure du budget des ménages évolue donc avec le niveau de revenu et les prix relatifs des différents biens et services. Avec les nouvelles priorités des politiques publiques, il est probable que nous assisterons à une modification des parts relatives du budget consacrées respectivement aux transports à courte distance, en régional et à longue distance. En d'autres termes, si nous réalisons des gains sur le transport à courte distance, il est possible de retrouver des réinvestissements dans le transport régional ou à longue distance, sans oublier qu'il est aussi possible d'avoir des réinvestissements susceptibles d'intervenir sur l'ensemble du budget du ménage.

Nous devons donc prendre en compte l'évolution de la répartition du budget transport entre les différents types de

mobilité, sachant que chaque type peut correspondre à plusieurs modes de transport. Mais, à ces ajustements de court et moyen termes de la mobilité, il faut ajouter les changements de long terme liés à la localisation des ménages et des activités. Dans TILT, le facteur localisation se réfère, d'une part, au coût relatif des opportunités ainsi qu'à leur accès et, d'autre part, aux politiques publiques qui orientent vers une consommation préférentielle de tel ou tel bien ou service. Les relocalisations se réaliseront évidemment de manière différente selon le type de ménage et les revenus disponibles (immédiatement ou dans le temps).

Ces résultats pointent du doigt trois effets qu'il faut garder en tête même s'ils ne sont pas directement évoqués dans chaque scénario :

- les changements économiques et l'endettement auront des impacts sur la consommation (ce qui a un effet direct sur le transport de fret) ;
- le développement d'inégalités pesant sur les ménages à plus faible revenu qui ne sont pas en mesure de se relocaliser à proximité d'un réseau TC et pour lesquels il serait trop onéreux pour la société d'offrir des TC sur mesure [28] ;
- de façon générale, l'acceptabilité des politiques publiques suite à ces changements.

Politiques publiques dans chaque scénario

L'analyse de sensibilité des politiques publiques en jeu dans chacun des scénarios permet d'éclairer l'importance de chaque action sur chaque type de scénario. Ainsi, nous observons (Figs. 8,9) que, dans Pégase, les effets les plus importants sur les émissions proviennent de la technologie hybride et des politiques publiques de régulation visant une gestion optimale des trafics soutenue par des avancées technologies autres que motrices. En revanche, Chronos privilégie fortement les solutions de la tarification et de la gestion

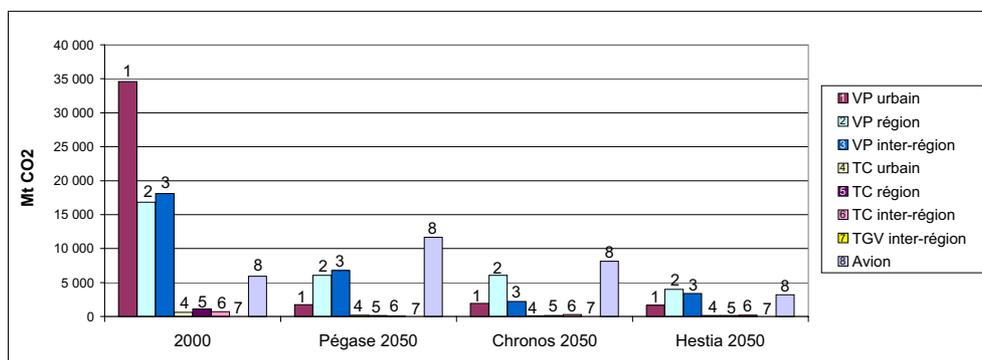


Fig. 8 Émissions transport des passagers en 2050

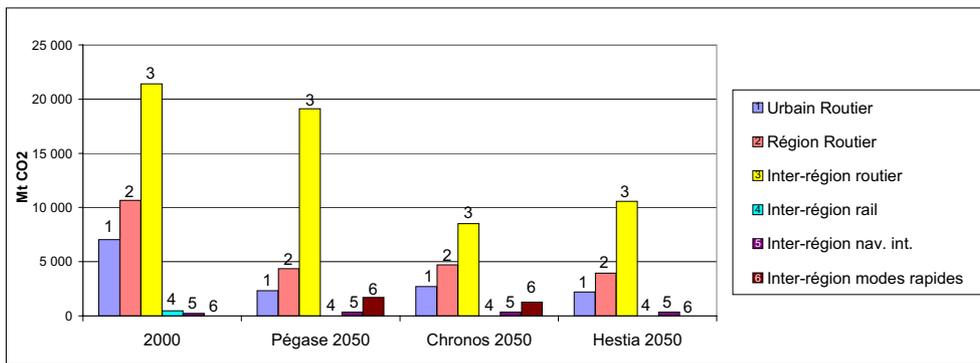


Fig. 9 Émissions transport des marchandises en 2050

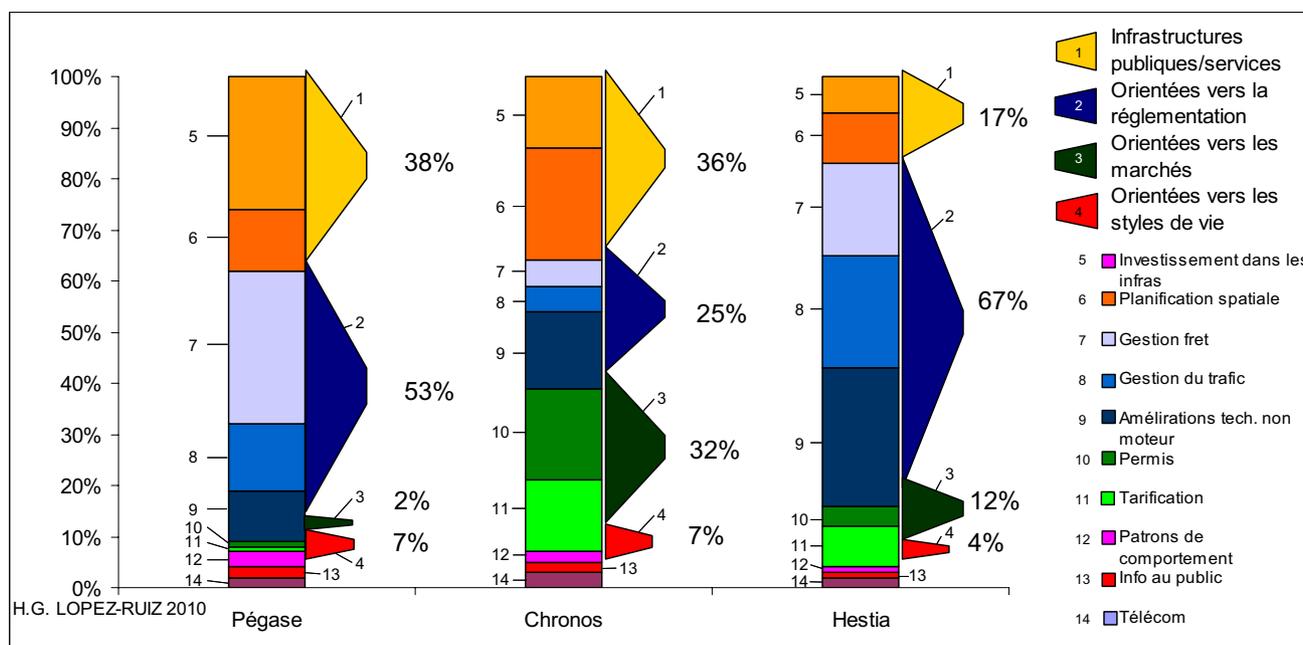


Fig. 10 Analyse des politiques publiques

de trafic, mais il ne faut pas oublier que ce genre de politiques génère un fort besoin en matière de planification spatiale. Hestia fait apparaître une optimisation des distances par rapport aux coûts de transport et des nouvelles configurations des bassins de vie et de consommation (Fig. 10).

Ces résultats permettent de réfléchir à des politiques publiques ayant une influence sur des nouveaux arbitrages appelant à une organisation associant des changements profonds dans le système de transport tel que nous le connaissons. Ainsi, l'analyse multicritères du module « politiques publiques » de TILT fait apparaître l'importance des effets des politiques publiques liées à la gestion du transport et de la planification spatiale. Néanmoins, cette analyse demande aussi que l'on creuse les détails sur la faisabilité micro-

économique de ces trois scénarios et, plus important, les leviers d'adaptation disponibles.

Comme le montre l'analyse multicritères, dans Pégase, les effets les plus importants sur les émissions proviennent de la technologie hybride et des politiques publiques de régulation visant une gestion optimale des trafics soutenue par des avancées technologies autres que motrices. Dans Pégase, nous observons que 67 % des effets sur les émissions propres à ce scénario qui ne sont pas dues aux technologies motrices (48 %) proviennent d'une gestion améliorée des trafics.

Un tel résultat est dû au fait que, même si le coût du transport routier augmente dans ce scénario, l'accroissement de la vitesse supposerait que les agents économiques soient prêts à payer plus pour se déplacer plus rapidement si cela leur offre

des nouvelles opportunités et également à se désengager de la voiture, à condition que les autres modes présentent un risque de retard inférieur grâce à une gestion améliorée.

De ce fait, dans la logique microéconomique de TILT, le rapport de base qui résume la décision des agents $\eta = \frac{\text{opportunité}}{\text{coût du transport}}$ reste inchangé.

De ce fait, Pégase est un scénario lourd en investissements d'infrastructures ferroviaires rapides, mais également en matière d'infrastructures routières. Globalement, TILT évalue le besoin d'investissements à hauteur de 1 927 milliards d'euros — courants — sur une période de 50 ans (indépendamment des frais de fonctionnement). La plus grande partie de cette somme est nécessaire pour maintenir les vitesses dans le secteur routier et pour améliorer les performances du ferroviaire.

En revanche, Chronos suppose que les passagers acceptent des temps de transport plus longs dus à l'important report modal favorable au rail et aux TC. Cela implique par conséquent qu'une partie importante des transports se fasse par les transports en commun (un peu plus de 40 % de l'ensemble du trafic terrestre). Ainsi, implicitement, soit on suppose une forte augmentation du budget de transports (particuliers et entreprises), soit on suppose que l'augmentation de l'utilisation des TC observée est suivie d'une baisse de la part des TC dans le budget monétaire des ménages parallèlement à une hausse du niveau de service proposé par les TC.

Cela implique que le rapport η connaîtrait un changement sur le dénominateur qui rompt l'équilibre existant entre coût et opportunité, soit $\frac{\text{opportunité}}{\uparrow \text{coût du transport}}$.

Ainsi, une double adaptation apparaît dans Chronos afin de pouvoir conserver une logique cohérente du point de vue microéconomique :

- si l'on suppose la constance de la structure du marché, il faut soit accepter une forte hausse de la part du budget des ménages consacrée au transport (historiquement stable autour de 15 %), soit accepter une forte hausse des apports des administrations publiques, elles-mêmes se finançant par une contribution climat et énergie ainsi devenue centrale dans la fiscalité. L'acceptabilité d'une telle révolution n'est bien sûr pas évidente ;
- en revanche, la stabilité de la part du budget des ménages consacrée aux transports va de pair avec une forte demande de rentabilisation du temps passé dans les transports, ce qui suppose un développement fort des nouvelles technologies de l'information.

Ainsi, pour que ce scénario soit viable du point de vue d'un équilibre entre les structures macro- et microéconomique, il faut supposer l'introduction progressive d'une taxe sur le CO₂ d'ici 2020 et son accompagnement d'une tarification de la route. De cette manière, le trafic routier

devient non rentable sur les longues distances et permet qu'une partie plus élevée des recettes des services de transports routiers retourne au budget de l'État sous forme d'impôts et de péages accrus pour être réinvestie dans des solutions pouvant contrebalancer le déséquilibre créé par la hausse de coûts, soit une augmentation des opportunités.

L'efficacité du rail est l'un des facteurs les plus importants du scénario Chronos. La densification du réseau et la progression de l'accessibilité permettent de réduire la distance moyenne des parcours. Cette meilleure accessibilité des villes peut se traduire en une réduction des trafics routiers et donc des émissions de CO₂. Toutefois, une accessibilité accrue du rail peut signifier une fluidité accrue dans le réseau routier, ce qui peut entraîner, à terme, une réaugmentation des distances parcourues. Néanmoins, la plupart des investissements nécessaires sont réservés au ferroviaire. Ce basculement généralisé sur le rail demande, par ailleurs, un fort développement des technologies d'information et de gestion du trafic.

De cette manière, Chronos suppose que de grands investissements soient effectués, non seulement en matière d'infrastructures, mais aussi en matière de technologies d'information aux usagers et aux transporteurs. Des systèmes d'information intelligents voient le jour, non seulement pour optimiser les chaînes de transport (pour les passagers et les marchandises), mais aussi pour offrir des services à bord qui augmentent la productivité du temps de transport. Dans ce scénario, en 2050, le transport ferroviaire propose des solutions de plus en plus adaptées aux contraintes sur les vitesses (qui poussent à la hausse le coût généralisé du transport) en même temps qu'il livre une rude concurrence aux transporteurs routiers sur le régional.

Dans le scénario Hestia, le poids du coût des services de TC devient un fort levier d'incitation pour la demande qui, accompagné des effets de proximité, permet d'envisager une structure qui profite fortement aux TC en exigeant moins en matière d'infrastructures supplémentaires avec des temps de transport moins importants que pour le scénario précédent.

À l'instar de Chronos, la baisse des distances parcourues permet à Hestia de conserver une stabilité du budget monétaire à condition de trouver un nouvel équilibre entre une forte utilisation des infrastructures routières urbaines et régionales et un grand besoin d'investissements en TC. Il est certain que ce nouvel équilibre ouvre la voie à des nouveaux besoins en matière de technologies de proximité qui permettent de garder une structure cohérente avec une amélioration limitée des infrastructures routières, une forte baisse du coût relatif des TC et une forte amélioration du niveau de service des TC.

De ce fait, Hestia est un scénario où la composante microéconomique η observe une hausse du coût de transport accompagné par une hausse des opportunités, soit $\frac{\uparrow \text{opportunité}}{\uparrow \text{coût du transport}}$.

Ainsi, avec Hestia, les changements dans la répartition modale du transport peuvent pousser à un développement des déplacements multimodaux, ce qui demande un fort développement des infrastructures ferroviaires. Le fait d'avoir une fluidité accrue dans la longue distance permet de réduire les investissements totaux sur la route, mais nécessite des efforts considérables sur la voirie urbaine et régionale.

Hestia fait, paradoxalement, porter un grand poids sur les infrastructures routières de proximité. En effet, dès l'instant où la densité des villes augmente et où les distances parcourues se réduisent, les parts des déplacements en urbain et en régional augmentent fortement et exigent une très forte optimisation des infrastructures routières de proximité, voire un certain développement.

Dans le scénario Hestia, apparaît une optimisation des distances par rapport aux coûts de transport et des nouvelles configurations des bassins de vie et de consommation. Hestia permet de réfléchir à des politiques publiques ayant une influence sur le coût d'immobilisation du transport des marchandises et la longueur des déplacements. Ce type de politiques peut avoir un effet important sur des nouveaux arbitrages appelant à une organisation associant des bassins de vie concentrés à un système productif moins concentré -et donc de proximité. Ainsi, l'analyse multicritères du module « politiques publiques » de TILT fait apparaître l'importance des effets des politiques publiques liées à la gestion du transport et à la planification spatiale. Ce genre de politiques publiques peut donc induire des effets positifs sur la longueur des trajets ainsi que sur l'optimisation des déplacements et le taux d'utilisation des véhicules.

La contraction de l'aire de transport et la déconcentration du système distributif pourraient entraîner un changement non seulement dans le taux moyen de remplissage des poids lourds, mais aussi dans l'utilisation des véhicules légers et particuliers. Ce changement peut présenter un avantage : étant donné que l'un des principaux problèmes posés par les nouvelles technologies de motorisation est l'autonomie des véhicules, les nouvelles technologies peuvent être plus rapidement disponibles sur les véhicules utilitaires et particuliers.

Ainsi, nous pouvons observer que, dans les apports de différentes politiques publiques, la tarification et les permis d'émission se présentent comme des déclencheurs dans le changement de comportements, mais que les véritables impacts proviennent des politiques qui permettent d'adapter le système au niveau des infrastructures, des technologies et leur phasage avec les actions de planification.

Le scénario Hestia se situe dans une logique où la réduction des distances parcourues laisse entrevoir une préférence

pour un changement complet des styles de vie. Une partie importante des investissements en R&D va dans les sens du développement des technologies pour des transports dans des zones plutôt denses et rapprochées qui proposent plus d'opportunités dans un espace donné.

Conclusions

Des scénarios comme Chronos ou Pégase apportent une solution au problème des émissions de CO₂ sous réserve que la taxation des tonnes de CO₂ atteigne un niveau très élevé. Mais même si cela était réalisé, une partie du problème seulement serait résolue. Avec Chronos, nous observons que l'efficacité de l'enchérissement de la vitesse pourrait aboutir à des résultats significatifs. Mais, au fur et à mesure que se restreint l'utilisation de la voiture, les besoins en matière d'investissement ferroviaire augmentent très fortement alors que diminuent les recettes liées à l'émission de CO₂. Avec Hestia, les contraintes sur le développement aérien sont fortes et les investissements en infrastructure de transport ne sont pas exorbitants, mais le besoin en investissements pour l'aménagement des zones urbaines est beaucoup plus important qu'avec Pégase ou Chronos.

Ainsi, nous voyons donc naître de nouveaux besoins en matière d'analyse :

- d'abord, nous retrouvons la question centrale de la temporalité, sur laquelle doivent intervenir les différentes politiques publiques. À quel moment faut-il lancer les investissements nécessaires ? Aux incertitudes sur le financement de tous ces changements s'ajoutent des questions sur la cohérence entre les différentes actions à mettre en place ;
- ensuite, nous sommes confrontés également à des questions portant sur l'équité des politiques publiques et leur acceptabilité. Quels seront les gagnants et les perdants de cette réorientation des politiques publiques, quels seront les mécanismes compensateurs ? ;
- enfin, se dessine aussi le problème difficile à résoudre du « dernier kilomètre » pour le transport des marchandises, mais aussi des personnes. Là où dominant aujourd'hui le camion et l'automobile, pourra-t-on développer des modes alternatifs associant efficacité technique et acceptabilité environnementale ?

Remerciements Les auteurs souhaitent remercier le comité éditorial de cette revue ainsi que les deux évaluateurs anonymes pour leurs conseils.

Annexe A

Hypothèses pour chaque scénario

Caractéristiques		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
Routier					
Marchandises	km/h				
	Routier national	50	60	52	52
	Routier international	–	50	52	52
Passagers	km/h				
	VP urbain	23	30	25	25
	TC urbain	20	24	20	22
Rail					
Marchandises	km/h				
	Rail national	40	40	40	40
	Rail international	–	40	40	40
Passagers	km/h				
	VP région	58	67	58	55
	TC région	58	68	57	54
Modes rapides					
Marchandises	km/h				
	Rail + avion national	40	63	45	45
	Rail + avion international	–	70	70	70
Passagers	km/h				
	VP interrégion	110	115	90	90
	TC interrégion	80	90	80	80
	TGV interrégion	250	250	250	250
	Avion	500	500	500	500
Total					
Marchandises	km/h	43	54/52	43/52	43/52
(national/inter national)					
Passagers	km/h	45	50	37	37
Élasticités					
Vitesse/PIB		–	0,33	0	0
t-km/PIB intérieur		–	0,6	0,6	0,3
t-km/commerce international		–	1,6	1,6	0,25
Macroéconomie					
Population		64	67	67	67
Taux de croissance du PIB			1,5	1,5	1,5
Enfants par foyer		2,19	2,15	2,15	2,15
Indice de productivité		100	225	225	225
BTT		1	1	1,2	1

t-km : tonne-kilomètre ; TC : transport en commun ; VP : voiture particulière.
H.G. Lopez-Ruiz 2009.

Annexe B**Niveaux de trafic**

GTKM/GPKM		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
Urbain					
Marchandises	Total GTKM	39	62	62	54
	Urbain routier	39	62	62	54
Passagers	Total GPKM	283	373	370	342
	VP urbain	263	279	310	264
	TC urbain	20	94	60	78
Région					
Marchandises	Total GTKM	34	54	54	47
	Région routier	34	54	54	47
Passagers	Total GPKM	192	378	344	265
	VP région	173	284	284	187
	TC région	20	94	60	78
Interrégion					
Marchandises	Total GTKM	254	408	408	332
	Interrégion routier	197	288	128	160
	Interrégion rail	50	59	232	142
	Interrégion nav. intérieure	7	10	10	10
	Interrégion modes rapides	–	51	38	20
Passagers	Total GPKM	363	639	574	485
	VP interrégion	280	200	84	114
	TC interrégion	22	32	172	121
	TGV interrégion	33	177	157	186
	Avion	29	230	161	63
Total					
Marchandises	Total GTKM	327	525	525	432
Passagers	Total GPKM	838	1 391	1 289	1 092

TC : transport en commun ; VP : voiture particulière.
H.G. Lopez-Ruiz 2009

Annexe C

Niveaux des émissions

1 000 t CO ₂		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
Urbain					
Marchandises	Total 1 000 t CO ₂	7 050	2 336	2 711	2 208
	Urbain routier	7 050	2 336	2 711	2 208
Passagers	Total 1 000 t CO ₂	35 216	1 913	2 042	1 786
	VP urbain	34 618	1 737	1 930	1 639
	TC urbain	599	176	113	146
Région					
Marchandises	Total 1 000 t CO ₂	10 651	4 345	4 716	3 936
	Région routier	10 651	4 345	4 716	3 936
Passagers	Total 1 000 tCO ₂	17 898	6 215	6 215	4 134
	VP région	16 838	6 075	6 075	4 002
	TC région	1 060	141	141	132
Inter-région					
Marchandises	Total 1 000 tCO ₂	22 135	21 198	10 139	10 925
	Interrégion routier	21 410	19 119	8 508	10 568
	Interrégion rail	475	0	0	0
	Interrégion nav. intérieure	249	356	356	356
	Interrégion modes rapides	–	1722	1275	0
Passagers	Total 1 000 tCO ₂	24 752	18 460	10 625	6 786
	VP interrégion	18 096	6 749	2 210	3 400
	TC interrégion	721	50	269	190
	TGV interrégion	0	0	0	0
	Avion	5 936	11 661	8 146	3 196
Total					
Marchandises	Total 1 000 tCO ₂	39 836	27 879	17 566	17 069
Passagers	Total 1 000 tCO ₂	77 867	26 589	18 883	12 705

TC : transport en commun ; VP : voiture particulière.
H.G. Lopez-Ruiz 2009

Références

1. LET-ENERDATA (Y Crozet, HG Lopez-Ruiz, B Chateau, V Bagard) (2008) Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ? Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Rapport final. PREDIT, Paris
2. Schipper L, Marie-Lilliu C, Gorham R (2000) Flexing the link between transport and greenhouse gas emissions. A path for the World Bank. International Energy Agency, Paris
3. Clement K (1995) Backcasting as a tool in competitive analysis. University of Waterloo. ISBM Report 24
4. Banister D, Stead D, Steen P, et al (2000) European transport policy and sustainable mobility. London
5. Schäfer A, Heywood JB, Jacoby D et al (2009) Transportation in a climate-constrained world. MIT Press, Cambridge, Massachusetts
6. Schafer A, Victor DG (2000) The future mobility of the world population, transportation research part A 34 171-205 09. National Academy of Engineering
7. Joignaux G, Verny J (2003) Le découplage entre transport de marchandises et croissance : organisations productives, localisations et demande de transport. XXXIXth ASRD Conference, Lyon, 1-3 Septembre
8. Banister D, Hickman R, Stead D (2006) Looking over the horizon: visioning and backcasting, (VIBAT)
9. Dreborg K (1996) The essence of backcasting. *Futures* 28 (9):813-28
10. Geurs K, van Wee B (2004) Backcasting as a Tool for Sustainable Transport Policy Making: The Environmentally Sustainable Transport Study in the Netherlands. *European journal of transport infrastructure research* 4(1):47-69
11. Lopez-Ruiz HG (2009) Environnement & mobilité 2050 : des scénarios pour le facteur 4 (-75 % de CO₂ en 2050). PhD thesis, University of Lyon, October 2009
12. Combes PP, Mayer T, Thisse JF (2008) *Economic geography: the integration of regions and nations*. Princeton University Press
13. Ben-Akiva M, Meersman H, Van De Voorde E (2008) Recent developments in transport modelling. Emerald, UK
14. Federal Highway Administration, ICF Consulting, HLB Decision Economics, Louis Berger Group (2001) Freight Benefit/Cost Study. National Cooperative Highway Research Program 342
15. Crozet Y (2009) Les perspectives de la demande de déplacements interurbains. OCDE/FIT Discussion Paper 2009-14
16. Consortium VLEEM (2002) "VLEEM 2." Final report. EC/DG Research
17. Romer PM (1990) Endogenous technological change. *J Polit Econ* 98(5-2):S71-S102
18. Bagard V (2005) Optimisation spatiotemporelle des pratiques de tourisme. Thèse pour le doctorat de sciences économiques (économie des transports). Université Lumière, Lyon 2, 318 p
19. Gallez C (1994) Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile. Thèse de doctorat en sciences économiques. Université de Paris-I-Panthéon-Sorbonne
20. Dorigo M, Di Caro G, Gambardella LM (1999) "Ant algorithms for discrete optimization." *Artificial Life* 5(3):137-72
21. Lomax T, Turner S, Skunk G, et al (1997) NCHRP Report 398. Quantifying Congestion Final Report
22. Lopez-Ruiz HG, Crozet Y (2010) Sustainable transport in France: is a 75% reduction in CO₂ emissions attainable? To appear in *TRR journal of the TRB*
23. Leontief W (1966) *Input-output economics*. Oxford University Press
24. Contrôle général économique et financier & Conseil général des ponts et chaussées (2006) Rapport sur la comparaison au niveau européen des coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des routes. Paris
25. Gronau R, Hamermesh D (2001) The demand for variety transportation: a household production perspective, National Bureau of Economic Research, working paper n° 8509
26. Commission des comptes des transports de la Nation (2007) *Les comptes des transports en 2007*. Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire, Paris
27. Artus P (2008) Prix des matières premières et délocalisations, *Flash-éco* n° 386 Natixis, septembre
28. Ubbels B, Verhoef ET (2006) Acceptability of road pricing and revenue use in the Netherlands. *European Transport/Trasporti Europei* 32 69-94