

Facteur 4 et mobilité des personnes et des marchandises : quels scénarios pour la France en 2050

Hector Guillermo LOPEZ-RUIZ¹

Doctorant

Université de Lyon

Laboratoire d'Economie des Transports

Lyon, France

E-mail: hector.lopez-ruiz@let.ish-lyon.cnrs.fr

Résumé

Afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, les experts du 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 (*i.e.* 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 ?

A l'aide du modèle TILT (Transport Issues in the Long Term), centré sur les relations macroéconomiques entre croissance économique, technologies, mobilité et émissions de CO₂, 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 qui, pour certaines, constituent de véritables bouleversements.

Mots clés : *Changement climatique, émission de CO₂, facteur 4, transport, mobilité des personnes, mobilité des marchandises, backcasting*

Abstract

In order to limit the impacts of climate change on the planet, the IPCC advocates the reduction of green house gas emissions by half. This objective imposes a 75% (factor 4) reduction on developed countries, like France. Can the transport sector meet this objective?

Using the TILT model (Transport Issues in the Long-Term) -which takes into account the macroeconomic links existing between economic growth, technology, mobility and emissions- this paper looks into the necessary conditions in order to attain a factor 4.

If technological progresses announced by engineers are met, we can get to a factor 2 (50% reduction), the rest of the reductions will have to be attained by changes in behavior and practices. Three scenario families are proposed in order to better illustrate the adjustments.

Key words : *climate change, CO₂ emissions, factor 4, transport, mobility, freight, backcasting.*

¹ Ce document reprend les premiers résultats d'une thèse en préparation au LET sous la direction de Yves CROZET et dans le cadre d'un partenariat entre le LET et ENERDATA sur la construction de scénarios de mobilité à l'horizon 2050 (financement ADEME et MEDAD). Le rapport final de cette recherche est disponible sur www.let.fr Dans cet ensemble, le travail de l'auteur de ce papier est centré sur les marchandises, raison pour laquelle cet aspect est plus développé dans les pages qui suivent.

Le troisième rapport du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) prévoit une augmentation moyenne de la température au sol pour la planète de 1,4 à 5,8°C d'ici 2100. Cela si aucune réduction importante des émissions de gaz à effet de serre résultant de l'activité humaine n'a lieu. Ce réchauffement provoquera des changements climatiques importants, une montée du niveau des océans et l'avancée des déserts. Ces événements entraîneront une transformation des conditions de vie et donc des politiques importantes d'adaptation accompagnées de lourds coûts économiques.

Afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, les experts du GIEC préconisent de limiter la concentration de dioxyde de carbone à moins de 450 parties par million en volume. Pour atteindre cet objectif, il faut réaliser une division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Cet objectif conduit à une division par quatre (*i.e.* facteur 4) des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés sur la même période afin de ne pas compromettre les perspectives de développement des pays en transition et en voie de développement.

Sur la base de ce constat, en France, les plus hautes Autorités de l'Etat ont fixé comme objectif à l'horizon 2050 la division par quatre les émissions de gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990. Sans reprendre précisément cette valeur (facteur 4 à l'horizon 2050), de nombreux pays industrialisés, notamment en Europe, se sont également donnés des objectifs quantitatifs de réduction des émissions de CO₂ (HICKMAN R., BANISTER D. 2005)

De telles ambitions semblent *a priori* démesurées. Compte tenu de la progression prévisible de la mobilité des biens et des personnes à l'horizon 2050, est-il réaliste de se donner de telles contraintes ? Le prix à payer sous forme de remise en cause des comportements de mobilité ne sera-t-il pas trop élevé, même en le comparant aux dérèglements décrits ci-dessus ? Sans prétendre à clore le débat, les lignes qui suivent cherchent à donner, dans le secteur des transports, un contenu concret à l'objectif général de division par quatre des émissions de CO₂. Cette contrainte globale peut-elle être satisfaite par les seuls progrès techniques que nous annoncent les ingénieurs ? Ou serons nous obligés de modifier nos comportements de mobilité ? et si oui, dans quelle proportion ?

Pour répondre à ces questions, nous utiliserons les résultats du modèle TILT.

- Dans une première partie, nous nous intéresserons à l'évolution tendancielle de la mobilité. Si devait se confirmer le couplage entre croissance économique et mobilité des personnes et des marchandises, quels seront les trafics, pour l'ensemble des modes de transport, en 2050 ? Et quelles seraient alors les émissions de CO₂ compte tenu des progrès techniques prévisibles ? L'ensemble de ces résultats constitue la première famille de scénarios, baptisée « Pégase ».
- Dans une seconde partie, le modèle TILT nous servira à imaginer deux autres familles de scénarios. La première baptisée « Chronos », s'intéresse aux réactions des ménages et des entreprises à une contrainte croissante sur le prix et la vitesse des déplacements routiers. La seconde, baptisée « Hestia », envisage un niveau de contraintes encore plus élevé conduisant à une réorganisation des programmes d'activités et des systèmes de production en vue d'une plus grande maîtrise des distances parcourues

1) « Pégase » : des scénarios tendanciels de mobilité et d'émissions de CO₂

Les scénarios proposés à l'horizon 2050 l'ont été en articulant modélisation et réflexion sur les modes de vie et l'organisation sociale. Dans cette première partie, nous partons du principe que les grands mécanismes qui prévalent aujourd'hui dans l'organisation économique et sociale resteraient globalement les mêmes. Comme, en matière de mobilité, les résultats prennent la forme d'une mobilité accrue des personnes et des marchandises, ce qui est qualifié de couplage (McKINNON,

2007 et SCHEAFER, 2000) ; nous avons utilisé la référence à un personnage symbolique de la mythologie grecque pour définir ce qui constitue notre scénario tendanciel : « Pégase », cheval ailé de Persée qui donne à son propriétaire la possibilité de franchir rapidement des distances considérables. Ne sommes-nous pas aujourd'hui déjà dans une telle situation puisque chaque Français parcourt annuellement déjà plus de 14000 kilomètres, soit plus de 40 kilomètres par jour ?

Sur cette base de couplage entre croissance économique et mobilité, le modèle TILT permet de mettre en cohérence une situation structurelle définie par des caractéristiques démographiques et économiques. L'objectif de TILT est de fournir des résultats concernant les besoins en matière de transport et des services énergétiques. Toute la logique de TILT est fondée sur l'idée d'interaction entre activité économique et besoins en transport, en tenant compte de la situation nationale (croissance) et internationale (globalisation), mais aussi des coûts de production, des niveaux de formation, de productivité, etc. TILT peut être qualifié de modèle « démo-économique ». Les inputs du modèle étant les variables démographiques et économiques indiquées ci-dessus. Les sorties du modèle sont les émissions de CO₂. La relation entre variables démo-économiques et émissions est faite par l'intermédiaire de modules de calcul des trafics, selon les modes. Pour le mode routier, le plus important, est utilisé un module d'évolution des parcs de véhicules, qui permet de modéliser la pénétration des nouvelles technologies. Le module de calcul des consommations énergétiques et des émissions liées est branché sur le couple évolution des trafics et évolution du parc.

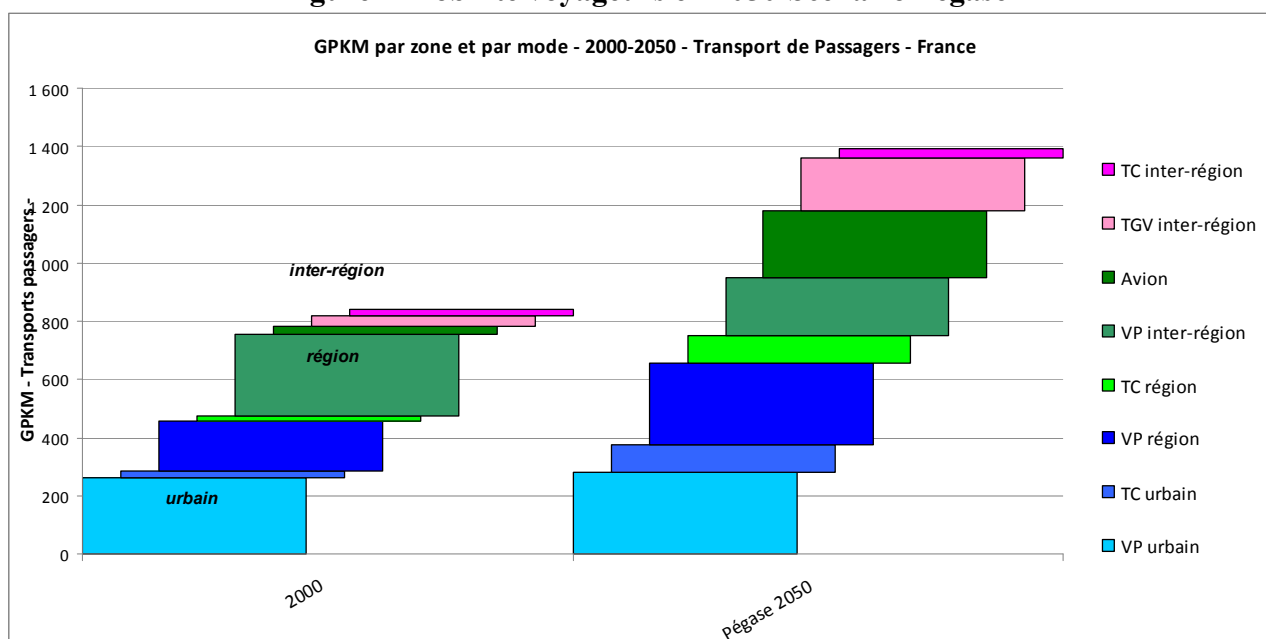
1.1) Quels trafics à l'horizon 2050 ?

Avec cet outil, il est possible de construire des scénarios fondés sur des hypothèses diverses de sentier technologique liés à un niveau de trafic de référence. Plus précisément, est calculée une distribution des trafics des différents modes en fonction des services de mobilité et de la technologie motrice ; et au type de service de mobilité. Ainsi, le scénario « Pégase » est construit en faisant des aller et retours entre les résultats et les inputs du modèle. De cette manière nous sommes, alors, capables de définir –dans une logique typiquement *backcasting*- ce dont on a besoin pour arriver au facteur 4. En jouant sur les variables d'organisation et des technologies il est possible de redéfinir le système des transports et analyser quels sont les effets des différentes politiques publiques visant à modifier la répartition modale ainsi que les effets que pourraient avoir les différentes technologies motrices sur le total des émissions de GES. Nous présenterons d'abord les résultats et les méthodes pour les trafics de passagers, puis pour les trafics de marchandises

Le transport de passagers dans la logique de TILT

Les ressorts propres au modèle TILT seront plus aisés à comprendre si nous présentons d'emblée les résultats. Le scénario Pégase, qui comporte une infinité de variantes, peut-être résumé par la figure 1.

Figure 1 Mobilité voyageurs en 2050-Scénario Pégase



Comme nous pouvons le voir, par rapport à l'année de base (2000), se manifeste une forte croissance des transports de voyageurs, tant pour les trafics régionaux qu'interrégionaux (plus de 40%). Les trafics en milieu urbain n'augmentent « que » de 25% en étant marqués par une forte progression de l'utilisation des transports en commun (TC). Notons que la croissance des déplacements en TGV, bus, métro ou tramway est beaucoup plus forte que la croissance de la mobilité automobile. Cela correspond à un choix que nous avons en quelque sorte imposé au modèle TILT : faire en sorte que la croissance de la mobilité s'oriente vers les modes collectifs, plus à même de réduire les émissions de CO₂. Mais dans ce scénario, nous n'avons pas limité la croissance du transport aérien car ce dernier joue un rôle clé dans l'accroissement des distances totales parcourues sans augmentation des budgets temps de transport (BTT).

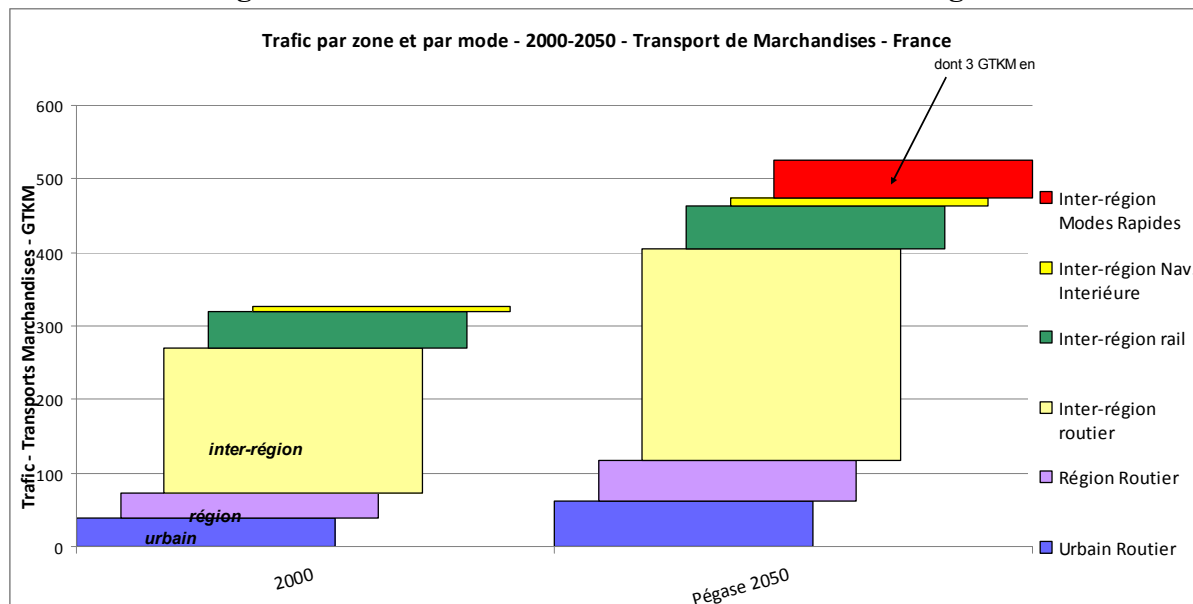
Cette relation étroite entre BTT, vitesse et distance totale parcourue a été souligné par A. SCHAFER (2001). Au fur et mesure que progresse le PIB, la nature de la demande de mobilité des passagers change. Le couplage entre croissance économique et distance parcourue se fait avec un BTT pratiquement constant car il se produit une substitution progressive des modes rapides aux modes lents. Le choix modal s'oriente systématiquement vers les modes plus rapides (TGV ou l'avion), ce que le modèle TILT prend en compte par le biais d'une élasticité vitesse moyenne/PIB dont la valeur, sans atteindre 1 comme chez A. SCHAFER, se situe aux alentours de 0,5. Cette notion est centrale pour comprendre la logique du couplage et le fait que les trafics des modes rapides progressent plus vite que le PIB. Ce couplage pose bien sûr un problème de soutenabilité environnementale étant donné la consommation énergétique du transport aérien et sa capacité émettrice de CO₂.

L'originalité de notre approche réside dans le fait que nous insistons sur le fait que l'augmentation de la mobilité de passagers (km/capita/année) est une conséquence directe de l'augmentation de la vitesse moyenne dans les transports. De cette manière, les rythmes de saturation des différents modes de transport diffèrent en relation avec l'élasticité vitesse/PIB. Autrement dit, l'automobile connaîtra selon nous une saturation relative pour les déplacements à longue distance. Un phénomène se manifeste déjà en France depuis le début des années 2000, avec une légère baisse du volume global de trafic sur les routes et autoroutes.

Le transport de marchandises dans la logique de TILT

La baisse du trafic routier des automobiles n'aura sans doute pas son équivalent pour les poids lourds. Comme le montre la figure 2, la famille de scénarios Pégase se traduit pour le fret par une nette progression des trafics de marchandises, essentiellement sur les routes. Comment expliquer cette différence entre trafic voyageur et trafic marchandises ? La principale explication réside dans les hypothèses que nous avons faites sur l'évolution des vitesses relatives des différents modes.

Figure 2 Trafic des marchandises en 2050-Scénario Pégase



En effet, la représentation du transport de marchandises dans TILT donne également à la vitesse une dimension très forte dans la structuration modale des trafics. Celle-ci repose sur l'existence d'une relation implicite entre l'accroissement de la valeur par tonne des marchandises transportées et la vitesse à laquelle ces marchandises sont déplacées. Avant de développer cette représentation au niveau des services de mobilité dans TILT, il convient de revenir sur les fondements de cette modélisation et de les approfondir.

L'analyse de l'évolution du ratio entre les Tkm transportées en Europe et les tonnes de pondéreux consommés en Europe sur les 20 dernières années montre une très grande stabilité. De cette observation, nous pouvons déduire que la structure de production en Europe (et son évolution au long de cette période) n'a pas entraîné de hausse de la distance globale sur laquelle les grands matériaux de base ont été transportés à leurs différents stades de transformation sur l'ensemble de l'espace européen. L'organisation spatiale de la production n'a pas eu d'incidence globale sur la distance globale de parcours, mais sur sa segmentation selon les différents stades d'élaboration des produits. En revanche, quand nous regardons ce même ratio au niveau français, nous observons une hausse de 35%.

D'autre part nous observons que les ratios Tkm national/T national et Tkm international/T international pour la France sont en hausse depuis 20 ans mais que le ratio Tkm intérieur/T intérieur est stable au long de la même période. Enfin nous observons qu'historiquement, le temps moyen passé par les marchandises dans un moyen de transport en France est relativement stable (+2% sur 15 ans) et que les vitesses des moyens de transport terrestres en France ne cessent d'augmenter (+15% sur 15 ans).

Ces constats nous laissent supposer que :

- Il y a bien un besoin croissant en matière de vitesse, au niveau français et européen, corrélativement à l'accroissement de la valeur ajoutée moyenne par tonne de produit transporté, lequel peut s'expliquer par la valeur croissante du coût d'immobilisation des marchandises
- Sur l'ensemble de l'espace européen, le besoin croissant en matière de vitesse ne conduit pas à une augmentation des distances globales de transport des tonnes de matériaux de base au cours de l'ensemble du processus de transformation au niveau européen.

Ces deux premières suppositions ne sont pas sans conséquence sur la situation française de par sa situation géographique. Plus les PIB de l'Europe et de la France augmentent, et plus leurs économies se spécialisent dans la production des marchandises à haute valeur ajoutée, et plus les inputs nécessaires à la production ainsi que les produits finis auront de la valeur. De ce fait, les marchandises devront être transportées de plus en plus rapidement à leur destination finale (en France ou en Europe). Dans le même temps, plus rapidement on peut transporter une tonne de marchandise finie à haute valeur ajoutée, destinée à la consommation, plus on peut étendre la zone de marché en augmentant les distances parcourues (ceci sans prendre en compte les dérives logistiques éventuelles liées à la faible part du coût du transport dans le prix de la marchandise).

En d'autres termes, l'observation des vitesses croissantes, si elle s'explique bien par le renchérissement des produits transportés, s'explique également par le fait que le renchérissement du coût du transport avec la vitesse a été moins rapide que le renchérissement de la tonne transportée, et n'a pas constitué un obstacle suffisant à l'élargissement des zones de chalandises des produits à haute valeur.

Cette idée nous amène à penser que les développements futurs du transport de marchandises pourraient se comparer aux changements qui seraient introduits dans le système par la construction ou la disparition d'une infrastructure de transport. En effet, l'apparition/disparition d'une infrastructure amène le temps de transport à augmenter ou à diminuer. Aussi, les acteurs (chargeurs logisticiens, transporteurs...) intègrent la nouvelle situation en minimisant leurs coûts logistiques par le temps de transport et donc de stockage et donc d'immobilisation.

Ainsi, si nous supposons, que :

- Le coût logistique d'une économie est la somme des coûts de toutes les firmes et que le changement proportionnel dans le coût moyen par Vkm est une combinaison de changements proportionnels dans le transport et un changement graduel dans les autres coûts.
- Que nous sommes dans un système où les coûts changent en rapport au coût de transport (proportionnel à la vitesse, à la valeur de la marchandise, au niveau du salaire et autres coûts propres du transport), au coût d'inventaire (soit le coût d'immobilisation) et aux coûts d'achat du service
- Alors nous pouvons alors dire que le coût logistique pour une firme est défini par les véhicules kilomètres, le coût du service de transport, le coût de stockage et d'immobilisation et le coût d'achat du service.²

À partir de ces éléments de coût nous pouvons calculer la fonction de demande de transport et modéliser les effets sur le système dans son ensemble de l'introduction d'une amélioration ou d'une détérioration dans le système de transport. Ainsi, nous pouvons calculer le coût et la demande de transport à la période suivante avec les mêmes équations en rajoutant les effets de cette amélioration

²Analyse fait sur la base du white paper "Freight Benefit/Cost Study" du NHCRP 342 (National Cooperative Highway Research Program 342) de la Federal Highway Administration du DOT américain.

ou détérioration sur les kilomètres parcourus. A partir du moment que le système logistique connaît une réorganisation ou que le système bénéficie de nouvelles infrastructures assurant une amélioration des vitesses, nous serons en présence d'un double effet :

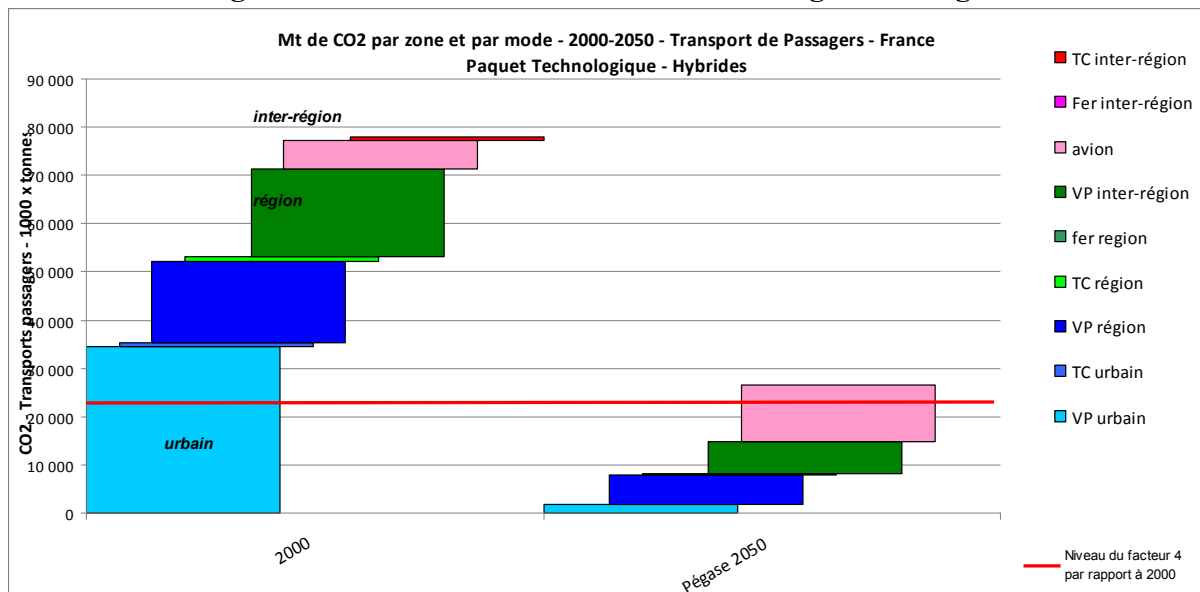
- Une amélioration de la vitesse générale du système de transport qui fait que les tonnes produites dans un espace donné pourront aller plus loin dans le même temps de transport pour un coût marginal réduit (du fait que le transport ne prendra plus longtemps, seulement les coûts liés à l'usure et au carburant augmenteront avec la distance). Cet effet est extrêmement important, notamment quand nous comparons le coût marginal du transport avec la disposition à payer pour aller plus loin. Etant donné que la disposition à payer est fonction des ventes totales d'une entreprise du coût logistique et du changement dans le temps de transport.
- Cela rend possible l'ouverture de nouveaux marchés possibles. Il semble clair que pour une entreprise, sa disposition à payer pour transporter plus loin et ouvrir des nouveaux marchés doit être égal à une partie fixe de ses ventes totales (soit son coût logistique fixe).

Ce double effet aura comme conséquence une réduction du prix du produit, qui aura un impact sur la demande du produit et donc la quantité transportée. En même temps, le fait d'augmenter l'aire de marché potentielle permettra d'augmenter d'avantage les quantités requises pour saturer les nouveaux marchés. Dans ce mouvement d'ensemble, le transport routier de marchandises risque fort de conserver, ou peu s'en faut, la part de marché qui est déjà la sienne dans la mesure où, dans le scénario Pégase, la vitesse relative du mode concurrent, le ferroviaire, ne connaît pas d'amélioration notable. Une hypothèse que nous leverons dans les autres scénarios.

1.2) Quelles émissions à l'horizon 2050 ?

Dans TILT, le modèle d'émissions a pour objet de calculer la consommation de carburant du secteur transports ainsi que les émissions qui y sont associés. Autrement dit, le modèle d'émissions permet de traduire les passagers-kilomètres et les tonnes-kilomètres en tonnes de CO2 comme le montrent les figures ci-dessous.

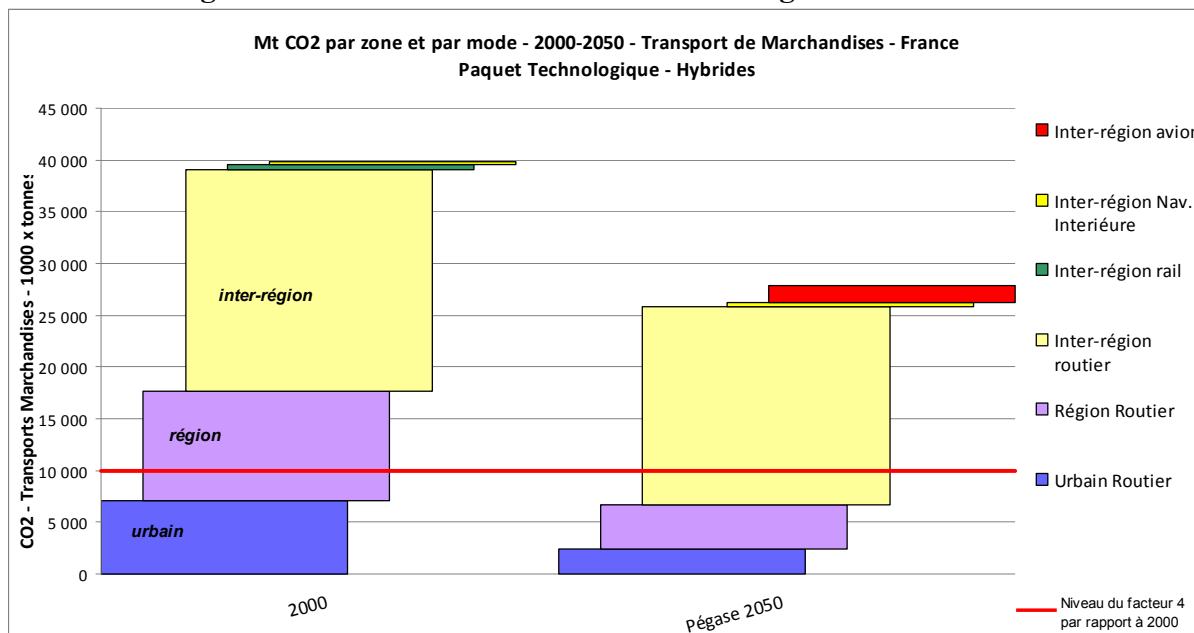
Figure 3 Emissions GES en 2050 scénario Pégase-Passagers



Nous y découvrons 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 pénétreraient dans le parc dès les années 2010-2013 (voir encadré sur les technologies). A 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.

Figure 4 Emissions GES en 2050 scénario Pégase-Marchandises



Comme nous pouvons voir, le fait de ne pas opérer de grands changements dans les programmes d'activités des individus, et le système de production et de distribution des marchandises fait que la plupart de l'effort de réduction provient des nouvelles technologies. Ainsi, nous pouvons observer que, en supposant un niveau technologique qui paraît atteignable, nous arrivons à diviser les émissions par 2, ce qui suppose que, dans l'absence d'une technologie « 0 émissions » ce qui resterait à réduire devrait se faire par des changements dans l'organisation du système des transports.

Encadré 1 : Hypothèses principales sur les technologies

Les choix technologiques dans les scénarios.

Pour l'ensemble des scénarios, plusieurs sentiers technologiques ont été envisagés avec différentes options au niveau de la motorisation, des années d'entrée au marché et de capacité de pénétration.

Les émissions liées aux configurations des scénarios Pégase, Chronos et Hestia présentés ici ont été calculées sur la base d'un sentier technologique où des hybrides bi-énergie avec une autonomie de batterie de 100 km pénètrent le marché à partir de 2010 et sont largement généralisés en 2050.

La modélisation des émissions est faite en recourant à trois modules :

- un module qui modélise la dynamique des parcs et l'introduction des nouvelles technologies dans le parc
- un module qui ventile les trafics générés par TILT pour les différents services de mobilité selon technologies utilisées

- un module qui calcule les consommations énergétiques et les émissions à partir des descriptifs techniques des différentes technologies.

En intégrant les différents modules dans TILT, il devient possible de quantifier les conséquences de la mobilité sur l'environnement tout en détaillant la structure des déplacements selon la technologie utilisée pour se déplacer, la dynamique du parc, la nature du déplacement et l'âge des véhicules.

Module de simulation des parcs et de pénétration des nouvelles technologies

Le module de simulation des parcs permet de prévoir la structure du parc tout en laissant l'opportunité d'être flexible en matière d'évolution des technologies, d'année d'entrée dans le marché et de rythme de diffusion. Ce module repose sur la simulation de deux dynamiques :

- Le retrait progressif du parc des véhicules en fonction de leur âge (loi de survie)
- La pénétration des nouvelles technologies selon une règle générale de diffusion des technologies nouvelles, fonction de l'année de démarrage de la technologie

De cette façon, le module de simulation des parcs fournit une répartition des véhicules du parc qui suit une règle de priorité primant d'abord les technologies génériques et donnant en suite priorité aux technologies à l'intérieur de chaque catégorie générique. La première fonction du module d'allocation est donc de ventiler le parc selon les différents services de mobilité, pour lesquels le kilométrage annuel et les conditions d'utilisation des véhicules sont spécifiques.

Une fois cette allocation faite, elle sert à ventiler les véhicules-km et les passagers-km par modes et par grands services issus de TILT, selon les technologies. Pour les VP, cette allocation prend en compte également l'influence de l'âge moyen des véhicules d'une technologie donnée sur le kilométrage moyen.

Module d'allocation des veh-km par classe d'âge des engins de transport et par technologie

Pour les modes terrestres, le module d'allocation des véhicules-kilomètres vise à la mise en cohérence des passagers kilomètres et des tonnes kilomètres selon la structure du parc pour chaque zone de service. Au final, le kilométrage réalisé selon la zone de service par chaque type de véhicule est calculé par le module qui donne une répartition des véhicules kilomètres par technologie motrice. L'évolution des véhicules kilomètres suit l'évolution des parcs, des comportements et de l'organisation qui sont déterminées par les autres modules du modèle.

Pour les modes maritime et aérien, le raisonnement des véhicules kilomètres est pratiquement le même que pour les modes terrestres. Afin de pouvoir imputer correctement la consommation et les émissions liées seulement aux ressortissants français et aux tonnes en provenance ou à destination du marché français, le module calcule le nombre de mouvements liés aux comportements et aux besoins de l'économie française.

Les hypothèses principales de ce calcul de mouvements sont :

- Le taux de remplissage moyen des aéronefs selon le type d'aéronef (nous considérons trois types d'aéronefs différents pour chaque zone de service)
- La distance moyenne parcourue par type d'aéronef et zone de service
- Le nombre de tonnes chargés et déchargés par mouvement et type de navire (vrac solide, vrac liquide, container, autres)
- La distance moyenne parcourue par type de navire et zone de service

Ces hypothèses peuvent être modifiées par le modélisateur à fin de faire apparaître des changements en matière de comportements et d'organisation.

Module de calcul des consommations d'énergie et des émissions de CO2

Le module de calcul des consommations travaille à partir des données fournies par le module de répartition du parc de véhicules et des véhicule-kilomètres (VK). La répartition des VK est croisée avec les données techniques relatives à chaque mode, chaque technologie, chaque zone de service, pour déterminer, dans le module « énergie-émissions », la consommation d'énergie des véhicules ainsi que les émissions liées aux trafics.

Couplé au modèle TILT, ce module constitue un moyen très puissant pour explorer les différentes voies possibles pour arriver, entre autres, à une division par 4 des émissions de CO2. L'utilité analytique du module repose sur sa capacité à prendre en compte de manière flexible l'influence des technologies par rapport à leur année d'arrivée sur le marché et leur plus ou moins grande facilité à pénétrer dans le marché.

Au total, les émissions de la famille de scénarios Pégase, ne diminuent pas d'un facteur 4. Au mieux, on peut espérer un facteur 2 sur l'ensemble, ce qui invite à rechercher d'autres familles de scénarios pour faire la deuxième partie du chemin à parcourir.

2) « Chronos » et « Hestia » : deux formes d'adaptation des comportements aux contraintes accrues sur la mobilité

Nous allons dans cette deuxième partie chercher comment pourraient se faire les modifications de comportement nécessaires à une réduction des émissions de CO2 allant au-delà de ce que permettent les seuls progrès techniques. Pour cela, nous allons modifier quelques paramètres clés à l'intérieur du modèle TILT, des modifications en apparence bénignes, mais qui renvoient en fait à des inflexions majeures dans les comportements des individus et des firmes.

Comme le montre l'encadré n°2, 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 BTT de 20%, qui offre la possibilité de continuer la fuite en avant des distances, 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 va donc limiter fortement la hausse tendancielle des distances, ce qui signifie un recentrage sur des activités de proximité. C'est la raison du qualificatif « Hestia », nom donné dans la mythologie grecque à la déesse du foyer. La même logique de retour relatif à la proximité s'impose pour le fret avec la réduction de l'élasticité tonnes-kilomètres/PIB (0,33 au lieu de 0,63) et de l'élasticité tonnes-kilomètres/commerce extérieur (0,25 au lieu de 1,6).

Encadré 2 : Hypothèses principales pour la construction des différents scénarios

Contexte macroéconomique pour tous les scénarios	
PIB 2002-2050	1,5% par an
Population métropole	67 millions d'habitants

Pégase	Passagers 2050	Marchandises 2050
Vitesse de l'ensemble du transport Intérieur	56 km/h	54 km/h
Elasticité vitesse/PIB	0,37	0,3
Elasticité T.Km/GDP intérieur	-	0,63 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur	-	1,6
BTT	1	-

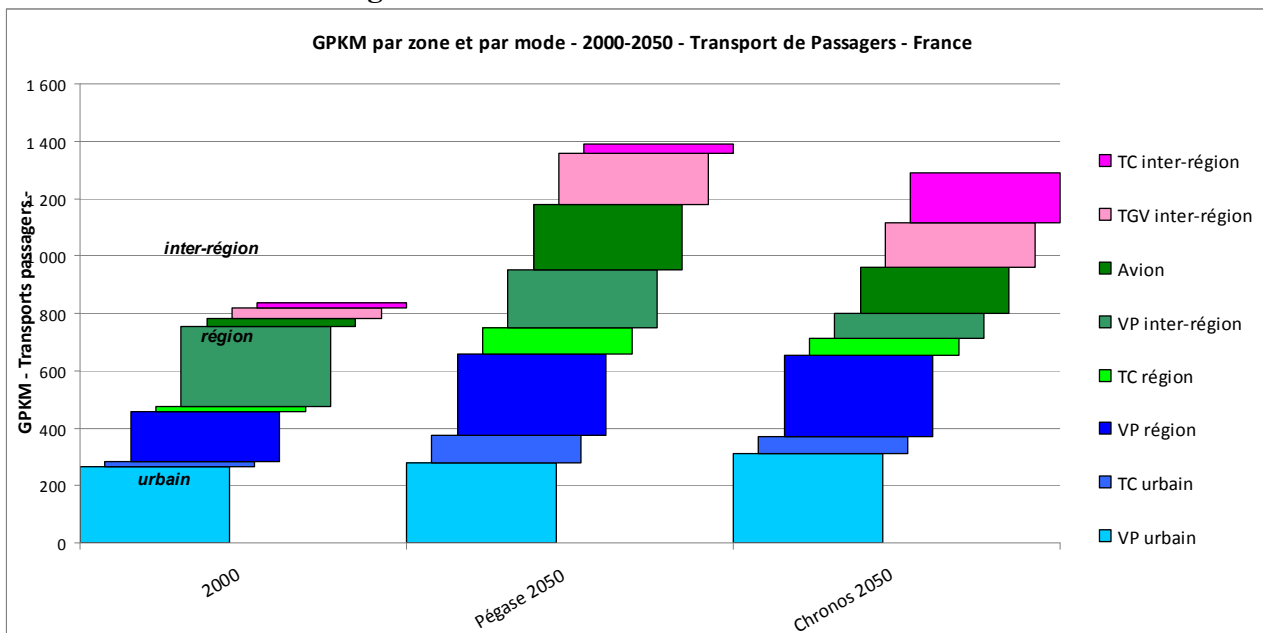
Chronos	Passagers 2050	Marchandises 2050
Vitesse de l'ensemble du transport Intérieur	49 km/h	43 km/h
Elasticité vitesse/PIB	0	0
Elasticité T.Km/GDP intérieur	-	0,63 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur	-	1,6
BTT	1,2	-

Hestia	Passagers 2050	Marchandises 2050
Vitesse de l'ensemble du transport Intérieur	49 km/h	43 km/h
Elasticité vitesse/PIB	0	0
Elasticité T.Km/GDP intérieur	-	0,33 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur	-	0,25
BTT	1	-

2.1) « Chronos » : réduction des vitesses routières et persistance du couplage croissance économique et mobilité

Dans Chronos, pour les passagers domine une logique où une hausse du prix de l'utilisation de la voiture entraînera une hausse dans l'usage des transports en commun. Ce glissement vers les transports en commun modifiera le budget des ménages, qui réinvestiront les gains issus du passage à un mode relativement moins cher. Une partie sera réinvestie en relocalisation (pour s'approcher des infrastructures de transports en commun) et une autre sera réinvestie en services de transport en longue distance, notamment l'avion.

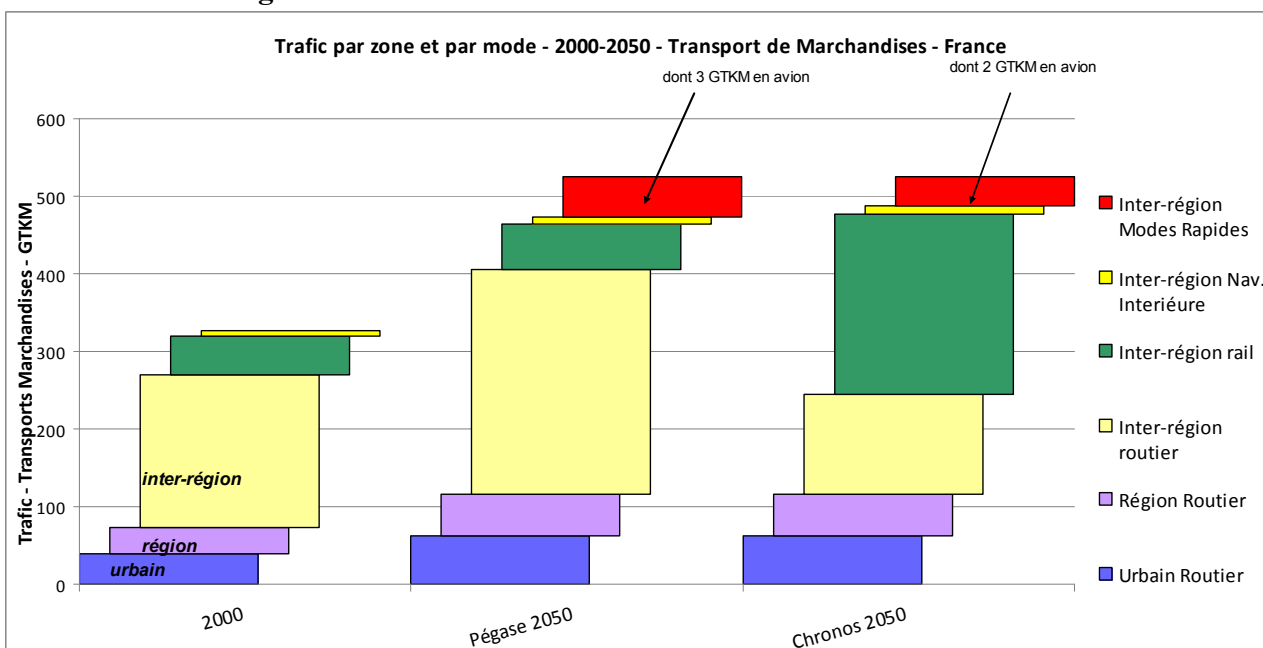
Figure 5 Mobilité en 2050-Scénario Chronos



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 accompagné d'un report modal vers des modes moins coûteux (à la fois plus lents mais aussi moins polluants). Ainsi, donc, le système chercherait à retrouver un équilibre en jouant sur la répartition modale afin de trouver une solution qui minimise 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 constante, ce qui conduit à une croissance accélérée du rail tandis que la vitesse sur la route stagne quasiment.

Figure 6 Trafic des marchandises en 2050-Scénario Chronos

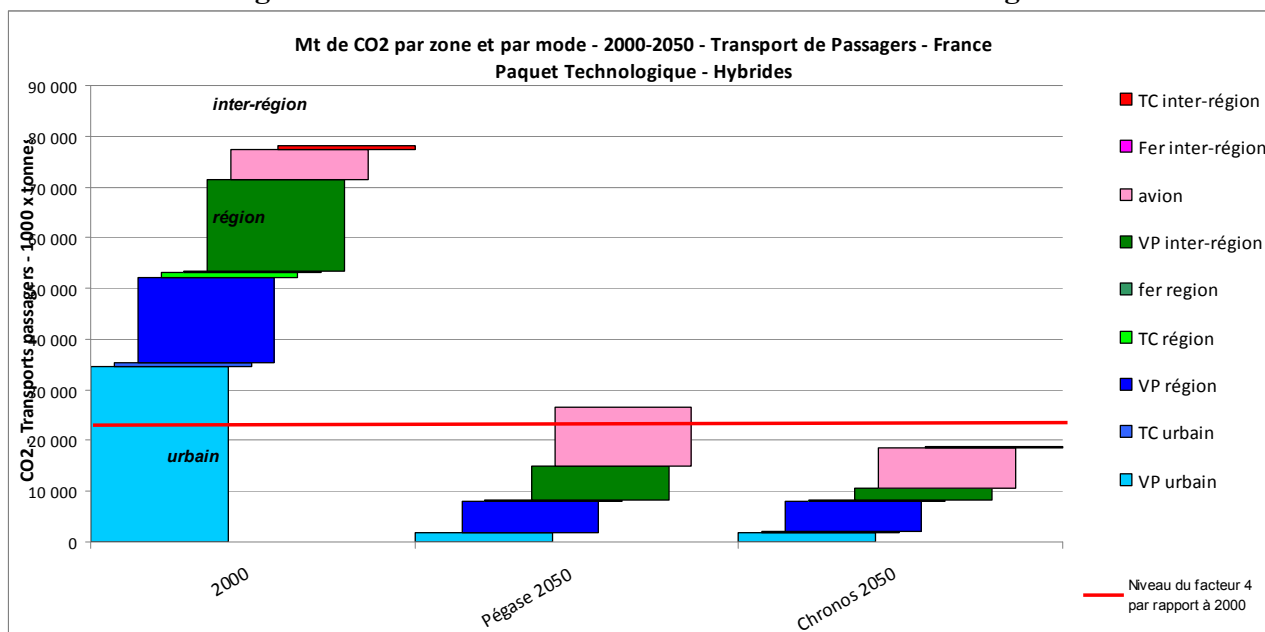


Les tonnes en excédent qui basculent sur le rail ne sont compatibles avec la faible vitesse moyenne du rail conventionnel que si une partie croissante bascule sur du rail rapide ce qui impose que celui-ci propose un meilleur service du point de vue du coût global du transport. Il s'agit d'un point central, 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%, soit l'exact opposé des évolutions souhaitées par tous !

En conséquence, dans Chronos, grâce à l'accroissement 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).

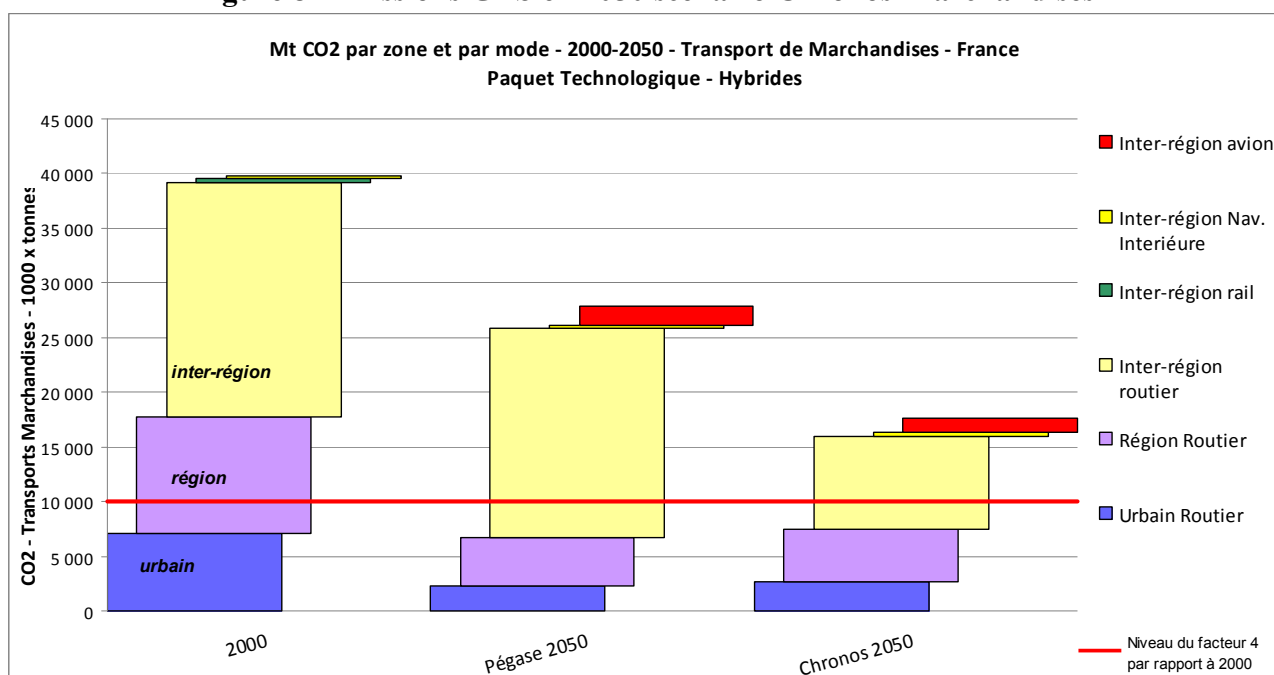
Sur la base des trafics prévisionnels en 2050, les émissions de CO2 sont estimées dans les figures 7 et 8. Il est à noter que les technologies sont ici les mêmes que dans le scénario Pégase (cf. encadré n°1) et que nous faisons aussi l'hypothèse très optimiste que la production croissante d'électricité ne provoque pas d'émissions accrues de CO2 du fait du recours au nucléaire et aux énergies renouvelables. Sur ces bases, le facteur 4 est atteint pour le trafic de voyageurs, malgré un développement poursuivi du transport aérien.

Figure 7 Emissions GES en 2050 scénario Chronos-Passagers



Il n'en va pas de même pour le transport de fret. Malgré le développement du 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.

Figure 8 Emissions GES en 2050 scénario Chronos-Marchandises



2.2) « Hestia » : quelles formes pourrait prendre le découplage entre croissance économique et mobilité ?

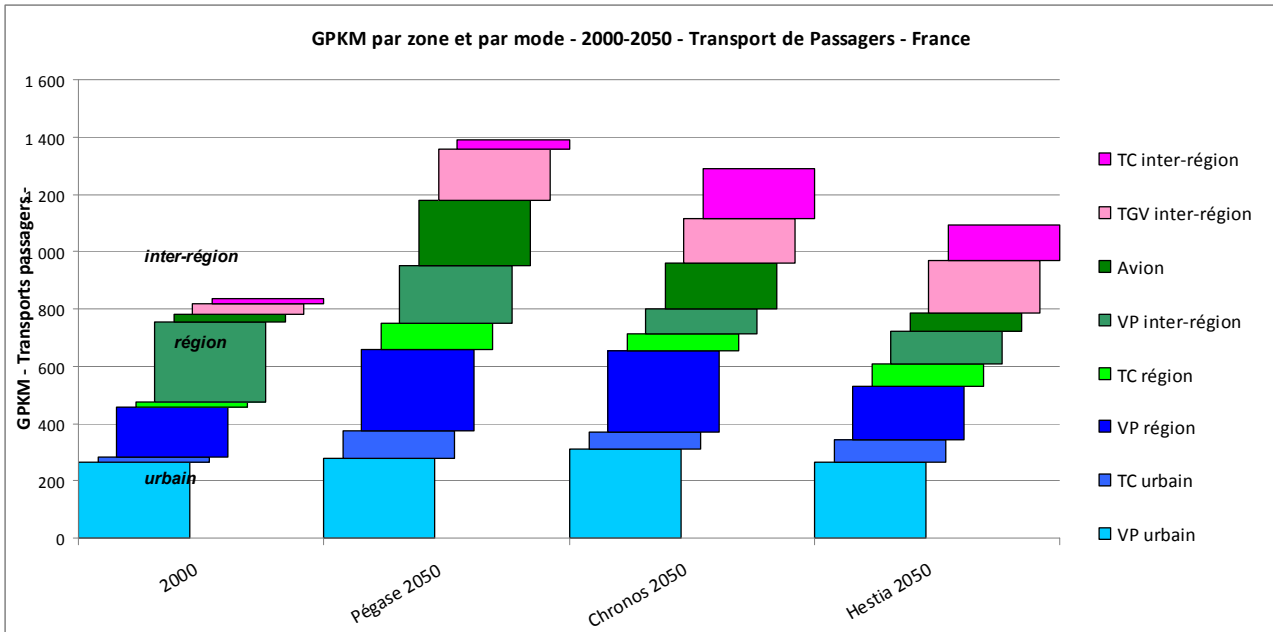
Si nous supposons une contrainte sur la capacité à payer plus de vitesse (par exemple, faire du transport aérien au lieu de transport terrestre) et si nous supposons une forte hausse du coût du transport, le système de transport pourrait être amené à changer sa structure productive en réduisant les distances parcourues. Autrement dit, nous pouvons supposer que le système économique s'adaptera à un coût du transport relativement élevé et que, dans un souci de minimisation des coûts, il cherchera à relocaliser les activités (voir annexes).

Les particuliers, comme les entreprises chercheront à maximiser leur profit en réduisant les distances parcourues. Une réduction fondée sur le fait que les entreprises chercheront à se rapprocher des lieux d'habitation et que les personnes chercheront des services de proximité. Ainsi, nous pouvons dire qu'il semblerait que le choix polaire d'une adaptation du système par le temps de transport (cf. Chronos) pourrait être une adaptation par les distances (Hestia).

Comme nous pouvons le voir sur les graphes expliquant le trafic des passagers, la logique ressemble beaucoup à celle de Chronos, la différence se situe au niveau de l'importance de la baisse de la demande de transport en voiture particulière sur les trajets régionaux et longue distance ainsi que sur l'importance de la partie du budget réinvestit dans la relocalisation. Une fois le coût du transport devenu trop onéreux, les entreprises seraient amenées à relocaliser toute une série d'activités afin de proposer des services de proximité. En effet, une fois passé le seuil du supportable de la disposition à payer d'une entreprise, elle préférera s'approcher de son aire de marché que de continuer à transporter à des prix exorbitants.

Ainsi, comme nous pouvons observer, Hestia connaît une hausse des kilométrages 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 des modes plus propres mais aussi sur l'implantation spatiale des lieux d'habitat ainsi que des activités et l'organisation de la production et de la consommation.

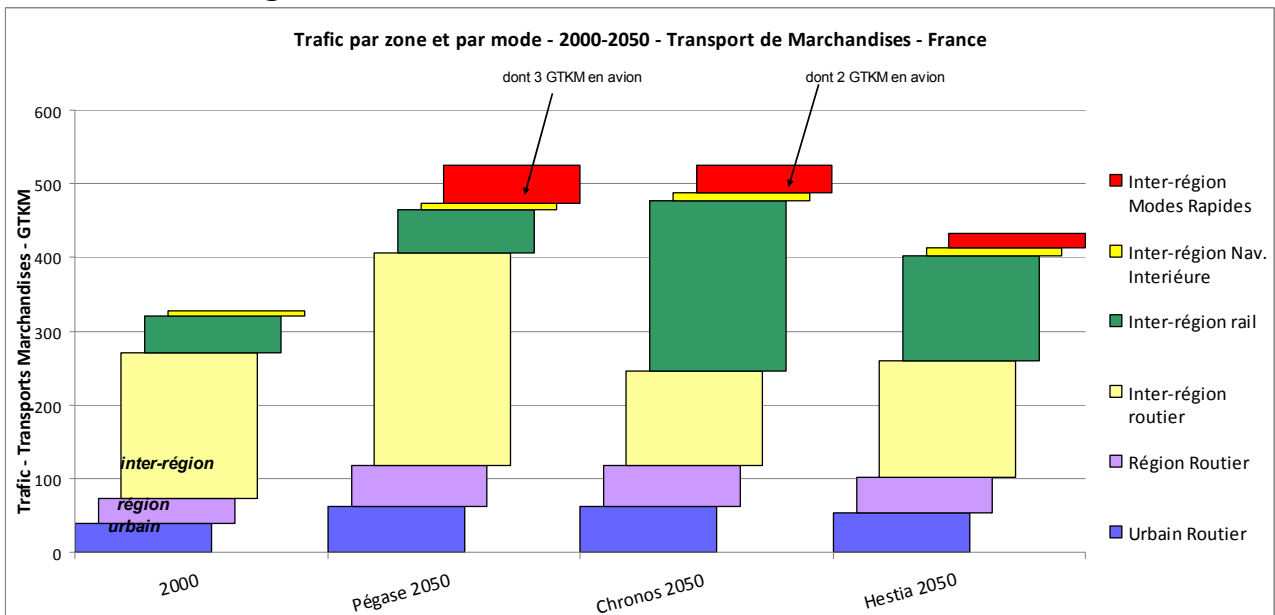
Figure 9 Mobilité en 2050-Scénario Hestia



Pour les passagers, la principale différence avec les scénarios Chronos est donc la moindre hausse des distances totales parcourues par rapport à l'année 2000. Il est à noter une baisse sensible des trafics VP mais ceux-ci ne disparaissent pas, notamment parce que le transport aérien a été beaucoup plus contraint que dans le scénario précédent, par exemple par un système de permis d'émission négociables.

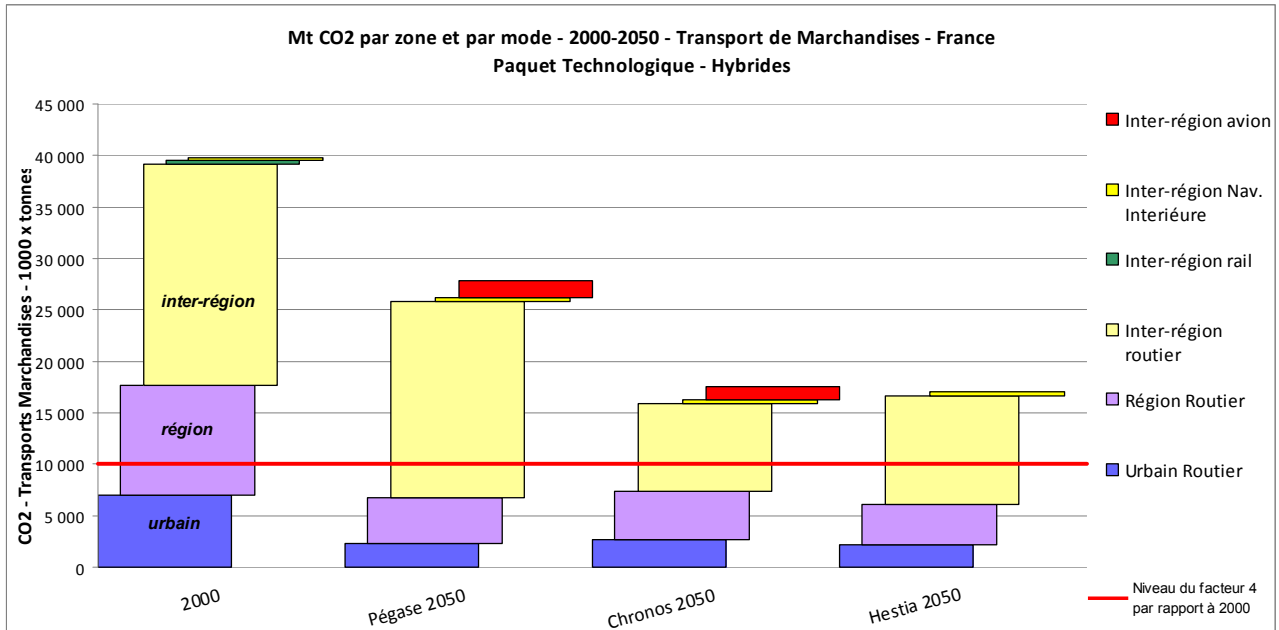
Les mêmes évolutions caractérisent le transport de marchandises même si, là encore, le transport routier subsiste, pour la simple raison que le retour à la proximité est finalement moins favorable au ferroviaire. C'est un résultat paradoxal qui mérite d'être souligné : la proximité limitant les possibilités de massification, elle donne moins de chances au ferroviaire.

Figure 10 Trafic des marchandises en 2050-Scénario Hestia



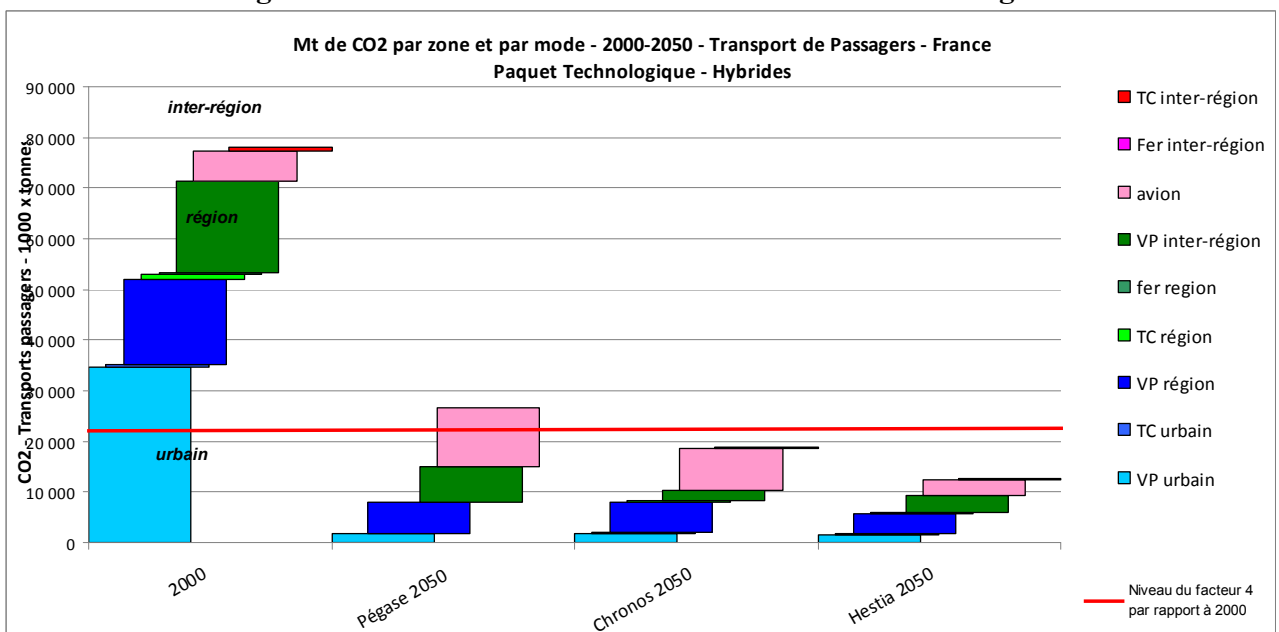
Cette logique de rapprochement et la moindre massification a un impact sur les émissions de GES. Même si, grâce à la réduction des kilométrages moyens, les technologies de type hybrides retrouvent, dans la configuration de Hestia, une efficacité accrue quant aux réductions des émissions unitaires du trafic routier l'importance relative de celui-ci fait que dans Hestia les émissions de CO2 sont à peu près les mêmes que dans Chronos. C'est l'autre face du paradoxe présenté ci-dessus. Dans la famille Hestia pas plus que dans la famille Chronos, nous ne sommes en état d'atteindre le facteur 4 pour le fret.

Figure 11 Emissions GES en 2050 scénario Hestia-marchandises



Les résultats sont meilleurs pour les passagers où nous réussissons même à faire un facteur 5, avec les mêmes hypothèses technologiques optimistes que dans Chronos et Pégase. Mais cela suppose que l'avion ait été très fortement contraint en volume de trafic.

Figure 12 Emissions GES en 2050 scénario Hestia-Passagers



Conclusion

A partir de ces résultats, il reste clair que la première des solutions à mettre en œuvre est celle d'une rapide diffusion des nouvelles technologies. Mais, nous ne pouvons pas tabler sur la seule solution technologique, il est impératif d'analyser les différentes possibilités en matière de changement des comportements. Mais ces changements peuvent prendre plusieurs formes, certaines étant paradoxales.

- La première question qui se pose concerne le transport aérien. Etant donné les fortes potentialités de croissance des trafics, et malgré les progrès techniques attendus, le transport aérien va devenir un gros consommateur d'énergie fossile. Que faut-il faire face à ce risque ? Sanctuariser le transport aérien, au nom de la modernité, et symétriquement faire peser des contraintes très lourdes sur les autres secteurs, notamment le transport routier de voyageurs ? Ou au contraire placer le transport aérien sous tutelle afin qu'il ne se révèle pas prédateur par rapport aux autres activités de transport ? Voilà en tout cas un beau dilemme pour les politiques publiques !
- La seconde question est inspirée par le résultat paradoxal des trafics et émissions comparés des scénarios Chronos et Hestia. La recherche de proximité ayant dans le secteur du fret réduisant les possibilités de massification, ne faudrait-il pas éviter cette orientation ?
- En combinant les deux questions, on voit poindre des arbitrages publics inattendus qui consisteraient à mixer sanctuarisation de l'avion et recherche de massification dans le fret. Le plus gros effort de réduction des émissions de CO₂ serait alors demandé aux utilisateurs de la VP. Ce serait le prix à payer pour conserver un accès relativement facile à l'avion et à la baisse des coûts qui accompagne la globalisation de la production et des échanges de marchandises. Un prix qui ne semble pas insupportable !

Bibliographie

1. ADEME- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (2003), *Les Energies et Matières Renouvelables en France - Situation et perspectives de développement dans le cadre de la lutte contre le changement climatique*, Débat National pour l'Energie. Site ADEME : www.ademe.fr
2. Alternative Fuels Contact Group (2003), *Market development of alternative fuels*,
3. BANISTER, D., PUCHER, J., LEE-GOSSELIN (2005), M. *Making sustainable transport politically and publicly acceptable: Lessons from the EU, USA and Canada*. Book Chapter. (<http://www.itls.usyd.edu.au/>)
4. BANISTER, D., D. Stead, P. Steen, J. Akerman, K. Dreborg, P. Nijkamp, R. Schleicher-Tappeser (2000), *European Transport Policy and Sustainable Mobility*. Spon, London.
5. BORIO C. & FILARDO A. (2007) *Globalisation and inflation: New cross-country evidence on the global determinants of domestic inflation*. BIS Working Papers No 227
6. CHANAS L. (1997), *Le développement durable : de la théorie à la pratique – Le cas du transport routier*, Mémoire pour le DEA d'Economie des Transports, présenté et soutenu le 25/9/1997, 96p.
7. CLEMENT K. (1995) *Backcasting as a Tool in Competitive Analysis*. University of Waterloo. ISBM Report 24
8. CROZET Y., MUSSO P., MARLOT G. (coord.) (2003), *Réseaux, Services, Territoires : Horizon 2020*, Editions de l'Aube, La Tour d'Aigues, 272 p.
9. CROZET Y. (2002), *Prospective pour une mobilité durable*, Transports, n°416, pp. 413-424.
10. CROZET Y., JOLY, I., (2004), *Budgets temps de transport: les sociétés tertiaires confrontées à la gestion paradoxale du « bien le plus rare*. Les Cahiers Scientifiques du Transport N° 45/2004 - Pages 27-48
11. Federal Highway Administration-DOT. *Freight Benefit/Cost Study*. NHCRP 342 (National Cooperative Highway Research Program 342).
12. HICKMAN R., BANISTER D. (2005) *Towards a 60% Reduction in UK Transport Carbon Dioxide Emissions: A Scenario Building Backcasting Approach*. http://www.ucl.ac.uk/~ucft696/documents/eceee_paper_04.05%20final1.pdf
13. HICKMAN R., BANISTER D. *VIBAT Study*. <http://www.ucl.ac.uk/~ucft696/vibat2.html>
14. LET-ENERDATA. (2008) *Scénarios de mobilité durable sous contrainte d'un facteur 4*. www.let.fr
15. McKINNON, A.C. (2007) *CO2 Emissions from Freight Transport in the UK*. UK Commission for Integrated Transport, London. <http://www.cfit.gov.uk/docs/2007/climatechange/index.htm>
16. McKINNON, A.C. (2007) *The Decoupling of Road Freight Transport and Economic Growth Trends in the UK: An Exploratory Analysis*. Transport Reviews, Vol. 27, No.1, 2007 pp.37-64.
17. SCHAFER, A., VICTOR, D.G.,(2000) *The future mobility of the world population* Transportation Research Part A 34 171-205
18. STERN, N. (2006) *Stern Review: The economics of climate change*. HM Treasury.
19. ZAHAVI, Y., (1981) *The UMOT-Urban Interactions*. DOT-RSPA-DPB 10/7. US Department of Transportation, Washington, DC.
20. ZAHAVI, Y., Talvitie, A., (1980) *Regularities in travel time and money expenditures*. Transportation Research Record 750, 13-19.