



HAL
open science

Environnement & Mobilité 2050 : des scénarios sous contrainte du facteur 4 (-75% de CO2 en 2050)

Hector G. Lopez-Ruiz

► **To cite this version:**

Hector G. Lopez-Ruiz. Environnement & Mobilité 2050 : des scénarios sous contrainte du facteur 4 (-75% de CO2 en 2050). Economies et finances. Université Lumière - Lyon II, 2009. Français. NNT : . tel-00523839

HAL Id: tel-00523839

<https://theses.hal.science/tel-00523839>

Submitted on 6 Oct 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Environnement & Mobilité
2050 :
des scénarios sous contrainte
du facteur 4
(-75% de CO₂ en 2050)

Hector G. LOPEZ-RUIZ

Université de Lyon

Faculté d'Economie

Laboratoire d'Economie des Transports

Thèse pour le doctorat en Sciences Economiques

Mention Economie des Transports

Membres du Jury :

M. CHATEAU, Bertrand - Directeur d'ENERDATA.

M. CROZET, Yves - Professeur Université Lumière Lyon 2 (directeur de thèse).

M. CRIQUI, Patrick - Directeur de Recherche au CNRS/LEPII.

M. MONZON, Andrés – Professeur Universidad Politécnica de Madrid (rapporteur).

M. MORCHEOINE, Alain - Directeur Air Bruit et Efficacité Énergétique ADEME.

M. MUÑUZURI, Jesús – Professeur Universidad de Sevilla (rapporteur).

M. VIEGAS, José - Professeur Instituto Superior Técnico (rapporteur).

Octobre 2009

Résumé

Afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, les experts du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution 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 (*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, cette thèse 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.

Mots-clefs : Modélisation, Facteur 4, Gaz à effet de serre, Couplage, Scénarios, Horizon 2050

Abstract

Environment & Mobility 2050: scenarios for a 75% reduction in CO₂ emissions.

In France an objective of dividing greenhouse gas emissions by four, from the 1990 level, by 2050 has been set. Are these ambitions out of our reach? What will the price to pay for this objective be?

We have built a long-term backcasting transport demand model (TILT, Transport Issues in the Long Term). This model is centered on defined behavior types -in which the speed-GDP elasticity plays a key role- in order to determine demand estimations. This model lets us understand past tendencies -the coupling between growth and personal and freight mobility and adapt behavioral hypothesis -linked to the evolution of public policies- in order to show how a 75% reduction objective can be attained.

The main results are an estimation of CO₂ emissions for the transport sector taking into account technical progress and demand. These results are presented as three scenario families named: Pegasus, Chronos and Hestia. Each family corresponds to a growing degree of constraint on mobility.

It is possible to divide greenhouse gas emissions in the transport sector by four. Technical progress is able to lead to more than half of these reductions. The interest of these scenarios is to show that there exist different paths –through organizational change- to getting the other half of the reductions.

Key-words: Modeling, Factor 4, Greenhouse gas, Coupling, Scenarios, 2050 horizon

Remerciements

Je remercie Yves CROZET, Bertrand CHATEAU et l'ADEME. Sans eux cette thèse n'aurait jamais pu aboutir. Je remercie, également, toute l'équipe du Laboratoire d'Economie des Transports et d'ENERDATA pour leur soutien et conseils.

Table des matières

Introduction	13
Partie 1. Spécifications sur la modélisation des scénarios de mobilité durable à l’horizon de 2050.....	17
Chapitre 1. Les bases méthodologiques et macroéconomiques.....	19
1.1.2 Le backcasting et la construction de scénarios à long terme.....	19
1.1.3 La base macroéconomique et la notation formelle du modèle TILT	26
Chapitre 2 Le lien entre les besoins macroéconomiques et la sphère microéconomique : Le module « Transports & Infrastructures » dans TILT	37
1.2.1 La définition des besoins en matière de transports	37
1.2.2 La prise en compte des infrastructures dans la modélisation	44
Chapitre 3. Les contraintes microéconomiques : Le module « Micro-comportements » dans TILT	57
1.3.1 Les arbitrages dans la mobilité des personnes	57
1.3.2 Les arbitrages dans le transport des marchandises.....	63
Chapitre 4. Les impacts : le module « Effets & Quantification des Politiques Publiques » dans TILT	71
1.4.1 La construction des « sentiers de politiques publiques »	71
1.4.2 Les effets des « sentiers de politiques publiques » sur l’économie française et le chiffrage des investissements	82
Chapitre 5. Les technologies, consommation d’énergie et leur quantification : Le module « Emissions » dans TILT	89
1.5.1 Emissions du transport à courte distance	90
1.5.2 Emissions du transport à longue distance	97
Partie 2. Des scénarios de mobilité sous contrainte de facteur 4 à l’horizon de 2050 pour la France.....	103
Chapitre 1 - Considérations sur les tendances et contre-tendances	105
2.1.1 Tendances générales et incertitudes : la base des familles de scénarios	105
2.1.2 De 2000 à 2050, quels développements et quelles hypothèses ?	111
Chapitre 2 - Scénario Pégase - Favoriser la réglementation stricte	125
2.2.1 Modélisation du trafic	125
2.2.2 Emissions et politiques publiques	134
Chapitre 3 - Scénario Chronos - Favoriser la multimodalité verte	145
2.3.1 Modélisation du trafic	145
2.3.2 Emissions et politiques publiques	154
Chapitre 4 - Scénario Hestia - Favoriser le découplage absolu.....	165
2.4.1 Modélisation du trafic	165
2.4.2 Emissions et politiques publiques	173
Conclusion.....	185
Bibliographie.....	191
Annexes.....	201
Annexe 1 : Consommations spécifiques et facteurs d’émissions de CO₂ des véhicules routiers	202
Annexes 2: Filières technologiques et facteurs d’émission indirecte ...	204
Annexes 3: Consommations spécifiques des navires	208
Annexes 4: Consommations spécifiques et facteurs d’émissions de CO₂ des avions	209
Index des Figures, Tables et Equations.....	211

Introduction

Le troisième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) prévoit, pour la planète, une augmentation moyenne de la température au sol de 1,4 à 5,8°C d'ici 2100. 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 : la montée du niveau des mers et des océans ainsi que l'avancée des déserts. Ces événements entraîneront une transformation des conditions de vie et, en conséquence, naîtra le besoin de la mise en place de politiques importantes d'adaptation qui seront accompagnées de lourds coûts économiques.

Afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, les experts du GIEC préconisent une limitation de 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,) sur la même période, des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés 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'Etat¹ ont fixé comme objectif à l'horizon 2050, par rapport au niveau de 1990, la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre. Sans reprendre précisément cette valeur (facteur 4 à l'horizon 2050), des nombreux pays industrialisés, notamment en Europe, se sont également donné des objectifs quantitatifs de réduction des émissions de CO₂ (HICKMAN R., BANISTER D. 2005).

Compte tenu de la progression prévisible de la mobilité des biens et des personnes à l'horizon 2050, de telles ambitions semblent *a priori* démesurées et nous pouvons nous poser un certain

¹ Le Comité interministériel pour le développement durable, en réévaluant le Plan climat de la France de 2004-2006.

nombre de questions : est-il réaliste d'imposer 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 clore le débat, cette thèse cherche 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 bien serons-nous obligés de modifier nos comportements de mobilité ? Et si oui, dans quelle proportion ? De toute évidence, ces premières questions nous imposent une quantification des besoins et des options que nous pourrions envisager. Pour ce faire, nous devons nous poser une deuxième série de questions sur la méthode et le modèle à utiliser pour réaliser cette analyse.

La thèse cherche à un double objectif :

- proposer une structure d'analyse à la fois du point de vue méthodologique et du point de vue de la modélisation formelle ;
- proposer des scénarios qui permettent d'identifier les éléments en jeu dans la réduction des émissions de CO₂ en France.

Une première base de cette structure a été jetée lors du rapport des scénarios LET-ENERDATA (CROZET, Y. LOPEZ-RUIZ, H.G. CHATEAU, B. BAGARD, V, 2008) et la thèse s'inscrit dans un mouvement de prolongation des travaux que nous avons réalisés dans ce premier rapport. Ainsi, dans sa première partie, cette thèse abordera exclusivement des questions sur la méthode et sur le modèle qui vont nous permettre de répondre à nos questionnements. Dans cet ordre d'idées, nous attacherons une importance particulière à l'analyse de l'impact des politiques publiques en identifiant, de manière solide, les liens existant entre la macroéconomie et la microéconomie. Pour nous, il est particulièrement important de représenter correctement ces liens de manière formelle afin de proposer un outil d'aide à la décision qui soit facilement utilisable ainsi que transposable à d'autres échelles géographiques, voire à d'autres pays.

Dans le premier chapitre de la première partie, nous aborderons la méthode générale qui encadrera la recherche et les bases de la formalisation du modèle quantitatif. Dans les chapitres deux, trois et quatre nous aborderons spécifiquement le fonctionnement interne du

modèle quantitatif et, dans le dernier chapitre, nous aborderons la question du lien entre la modélisation et la pratique : les politiques publiques et leur analyse.

Au fur et à mesure des chapitres, nous identifierons un nombre important « d'entrées paramétrables » que nous pourrions contrôler afin de pouvoir observer leurs effets sur le système lors de la construction des scénarios (deuxième partie de la thèse). Cette approche de paramétrisation permettra à l'outil d'évoluer avec l'utilisateur et l'objectif d'étude. La robustesse des liens existant dans le modèle entre l'échelle macroéconomique et l'échelle microéconomique ne saurait proposer des résultats qui signifient une situation non soutenable. Ainsi, certaines entrées pourront être paramétrées de différentes manières selon le type de politique publique que nous souhaitons analyser par rapport à un contexte technologique et macroéconomique défini.

Pour mieux appréhender les possibilités que le modèle quantitatif propose, il sera alors nécessaire de créer une classification de politiques publiques envisageables par rapport à leurs canaux d'influence sur le système. La qualité des résultats du modèle dépend grandement de l'identification des canaux d'influence des politiques publiques et des indicateurs qui sont attachés aux effets de ces influences. Dans ce sens, il est très important de proposer un arsenal de politiques publiques qui soit généralement accepté ainsi qu'une catégorisation qui soit uniforme et en rapport avec d'autres études prospectives existantes. Il sera aussi de première importance de définir correctement la relation existant entre la modélisation, la technologie, les politiques publiques et les comportements.

De cette manière, l'outil qui sera développé dans la première partie de la thèse nous permettra de construire des scénarios qui montreront les enjeux de la soutenabilité dans les transports en France. La deuxième partie de la thèse mettra en avant l'évolution du transport des passagers et marchandises en France depuis 20 ans et nous présenterons les trois scénarios construits dans le rapport LET-ENERDATA 2008. C'est à partir de ces scénarios que nous présenterons de nouveaux résultats qui apportent plus des précisions sur les questions d'analyse économique, des impacts des politiques publiques et des besoins en matière d'investissements.

Chaque scénario identifiera les différentes combinaisons de niveaux de trafics déterminés à un niveau macroéconomique d'une part et de niveaux de développement des technologies d'autre part, nécessaires pour atteindre l'objectif d'une réduction par 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. A cette structure des trafics viendra s'adosser une cohérence microéconomique résumée par la structure des coûts de transport et de niveau de service des infrastructures correspondant aux déterminants microéconomiques de la demande de l'année de base (2000).

De cette manière, les scénarios permettent de mettre en évidence des éléments de réflexion sur ce que veulent signifier au niveau économique les différents types de politiques publiques sur le système. L'intérêt de l'exercice est de faire apparaître des ruptures et des inflexions, qui s'imposent comme nécessaires, pour aboutir à une structure cohérente et soutenable à long terme.

Cette thèse cherche à développer une base d'analyse générale et robuste qui serve à modéliser différentes solutions possibles permettant d'arriver à un objectif à long terme qui soit fixé dans le présent. En outre, la thèse analyse l'objectif français du facteur 4 comme champ d'application de l'outil analytique développé.

Partie 1. Spécifications sur la modélisation des scénarios de mobilité durable à l'horizon de 2050.

Chapitre 1. Les bases méthodologiques et macroéconomiques.

1.1.2 Le backcasting et la construction de scénarios à long terme

Aujourd'hui, nous voyons apparaître des innovations techniques en matière de transport qui offrent un certain nombre de solutions aux problèmes environnementaux. De même, du fait d'une prise de conscience sociale, une forte demande pour des produits et des services « *environmentally-friendly* » se développe. Mais le cœur du problème environnemental ne réside pas dans un manque d'innovation technique (CROZET & MUSSO, 2003); c'est la désynchronisation entre l'offre technologique et la demande des services qui rend difficile l'utilisation massive de ces innovations techniques. En effet, le progrès technologique ne peut être effectif que s'il est accompagné d'une transformation profonde de l'organisation des entreprises et des pratiques de consommation. L'obstacle rencontré en matière de transports est lié au fait que les prix du transport n'internalisent que très imparfaitement les coûts environnementaux inhérents à la mobilité. Symétriquement, il n'existe pas une véritable prise en compte des bienfaits environnementaux des innovations techniques et des modes alternatifs de déplacement. La négligence ou la sous-estimation systématique des coûts environnementaux et d'autres externalités dans le prix des transports a une conséquence directe sur les signaux prix perçus par les usagers.

Ainsi, la réduction des émissions de CO₂ pour atteindre l'objectif de facteur 4 à l'horizon de 2050 ne passe pas seulement par le développement des innovations techniques mais aussi par l'apparition d'une demande de la part de la société et par la mise en place d'instruments économiques incitatifs. Il est impératif de développer un cadre organisationnel et institutionnel qui puisse synchroniser les développements techniques, ainsi que le

développement de nouveaux services et leur usage, avec une réglementation stricte, et des instruments économiques qui soient incitatifs et susceptibles de modifier les coûts d'usage relatif des modes.

Dans ce sens, il est nécessaire de confronter ceux qui décident d'effectuer un déplacement ou de transporter des marchandises aux conséquences de leur décision et d'inciter les personnes à utiliser des modes de transport qui puissent synchroniser l'offre technologique et la demande des services afin d'assurer une situation soutenable : il est souhaitable de mettre en place une politique environnementale mettant en synergie les connaissances et les compétences des industriels, des pouvoirs publics et des laboratoires de recherche dans un cadre organisationnel, technique et institutionnel qui puisse permettre le respect des critères de viabilité économique et juridique, avec un impact positif sur l'environnement. De toute évidence, l'analyse de toutes les possibilités envisageables pour atteindre à ce but -en les décrivant par leurs critères économiques et juridiques, nécessaires pour qualifier la viabilité des politiques environnementales- est une tâche titanesque qui ne pourrait pas être réalisée et présentée sans un cadre analytique.

Ainsi, pour les besoins d'analyse de la thèse, nous adopterons une structure de scénarisation qui nous permettra d'organiser et de présenter les politiques publiques -qui pourraient être mises en place comme des solutions au dérèglement climatique- de manière ordonnée et claire. En d'autres termes, l'analyse de la thèse ne saurait pas être -en raison du nombre d'options- une analyse précise et nette. De ce fait, la création des scénarios technico-organisationnels qui mettent en évidence l'impact des politiques publiques et des innovations techniques est non seulement souhaitable mais nécessaire. En outre, l'utilisation d'une méthode d'analyse qui permette de structurer les choix des scénarios par rapport à leur utilité et leur viabilité est nécessaire. A ce titre, nous identifions le besoin d'une méthode qui nous permette d'explorer les comportements et de travailler à très long terme en alliant des structures politiques, comportementales, économiques, environnementales, énergétiques et technologiques.

Sur ce point, nous avons cherché une approche normative, qui se focalise sur la faisabilité des différents scénarios afin d'arriver à l'objectif futur souhaité en évitant les conflits souvent présents lors d'une planification à long terme (DREBORG, 1996). Cette méthode est le

backcasting. Elle consiste à définir une situation de départ située dans le futur (soit 2050) et de travailler en aval -à l'inverse de la prévision- pour déterminer les scénarios pouvant répondre aux objectifs de la situation de départ dans le présent.

Le *backcasting* peut répondre à notre besoin de création de scénarios plausibles en combinant des solutions technologiques, économiques et réglementaires dans un cadre organisationnel et institutionnel, tout en ayant comme référence l'objectif d'un facteur 4. De même, le *backcasting* permet d'allier la modélisation des comportements et des techniques afin d'offrir une meilleure visibilité des scénarios de prévision (ROBERT, 2003).

La création de scénarios technico-organisationnels avec la méthode du *backcasting* nous permettra de partir d'un cadre général et de faire une analyse spécifique des différentes options technologiques et de leurs impacts économiques pour atteindre l'objectif du facteur 4 à l'horizon 2050. Cette capacité analytique de la méthode ouvre la possibilité d'analyser la soutenabilité de ce même objectif tout en offrant une vision nouvelle -concrète et appliquée- des politiques à mener pour parvenir à une situation de mobilité soutenable.

Pour GEURS et van WEE (2004), deux types des scénarios peuvent être identifiés : les scénarios de projection et les scénarios de prospective. Un scénario de projection (« *forecasting* ») a comme point de départ la situation actuelle et réalise une extrapolation des tendances actuelles. Un scénario de prospective (« *backcasting* ») a comme point de départ un futur que l'on cherche à atteindre, normalement décrit par des objectifs ou cibles. Le *backcasting* met en lumière les changements et différences entre le présent et des situations futures.

D'après GEURS et van WEE, la méthode du *backcasting* peut être morcelée en différentes phases qui permettent d'intégrer plusieurs aspects dans les analyses de prospective :

1. Détermination des objectifs ;
2. Spécifications des objectifs concrets ;
3. Description du système actuel ;
4. Spécification des variables exogènes ;
5. Analyse des scénarios ;

6. Détermination ce qui est requis pour l'implémentation ;

7. Analyse des impacts.

Comme l'écrit DREBORG: "*Typically backcasting is applied on long-term complex issues, involving many aspects of society as well as technological innovations and change*". C'est en effet la capacité du *backcasting* de pouvoir intégrer plusieurs aspects sociétaux pour avoir une réflexion qui cherche non seulement à identifier des ruptures mais aussi à les accompagner. Le *backcasting* est un outil d'analyse et d'aide à la décision au niveau politique sans oublier que la société est formée par des individus qui chérissent leur liberté, présente mais aussi future. Cette capacité du *backcasting* à se présenter comme un outil flexible de planification s'insère parfaitement dans l'idée selon laquelle « *le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs*². »

Il semble alors logique que l'on puisse observer que les différentes phases du *backcasting* font partie intégrante du cycle des politiques publiques³ (cf. Fig. 1). La scénarisation des solutions aux différents problèmes de société grâce aux techniques du type téléologique présente un outil très performant pour la décision. Grâce à sa capacité à présenter les différents enjeux et à rallier des disciplines différentes afin d'organiser et d'analyser les différentes options, la scénarisation prospective permet de disposer de tous les éléments pour prendre des décisions de manière claire et rapidement applicables.

² Extrait de la définition du développement soutenable du Rapport Brundtland publié en 1987. La citation complète est : Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion :

-Le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité

-L'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir.

³ Le cycle politique illustré est le cycle politique préconisé par Bridgman et Davis pour l'Australie, qui nous a paru le plus complet et explicatif sur le parcours logique allant de l'identification d'un problème à sa solution. Le cycle « classique » de 6 étapes est inclus dans ce schéma mais amélioré de deux étapes se référant au débat et à la coordination entre acteurs.

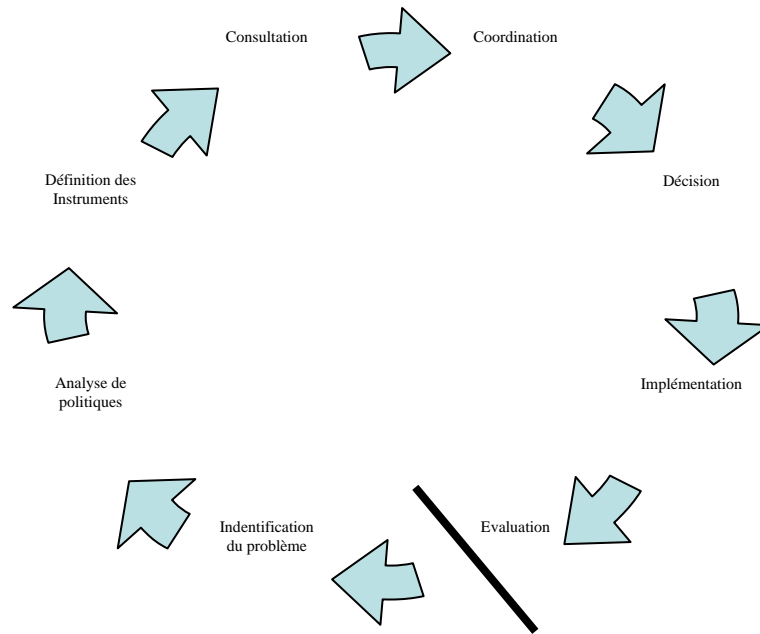


Figure 1 Cycle des politiques publiques

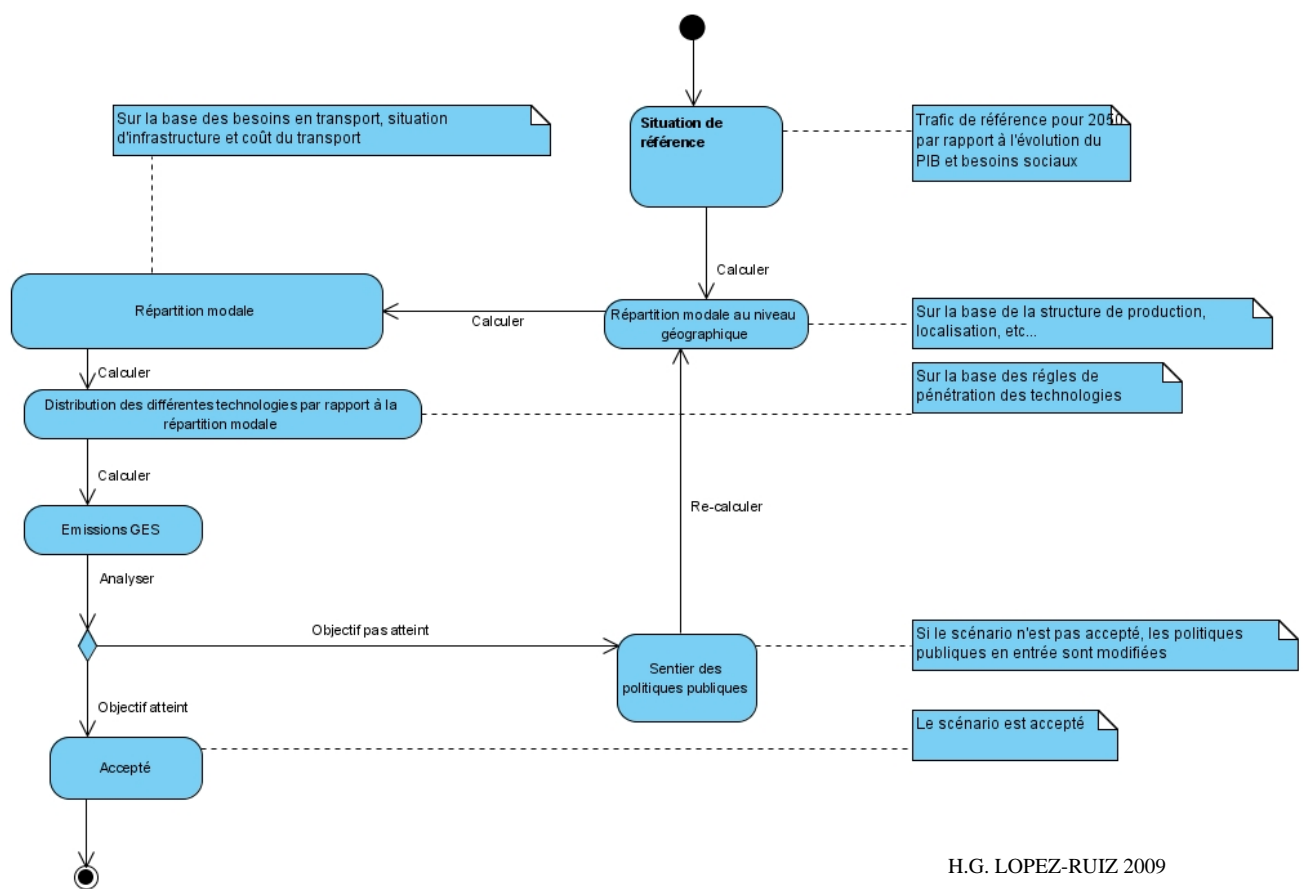
Il est aussi très intéressant d’observer que les différentes phases du *backcasting* ne font pas seulement partie du cycle des politiques publiques mais aussi des phases qui s’inscrivent dans les modèles comportementaux utilisés par la psychologie. C’est le cas, par exemple, du « générateur de nouveaux comportements » proposé par GRINDER et BANDLER (2005). Ce type de méthodes psychologiques cherche à identifier les comportements que l’individu souhaite -et peut- modifier et donne une série d’étapes afin de prendre conscience du problème, de l’analyser, de trouver les solutions et de les appliquer. Ce type de méthodes cherche à ce que les individus trouvent le moyen de changer ce qui pose problème sans que la peur de l’inconnu soit une barrière.

Les éléments communs de ces trois méthodes sont les suivantes :

- le souhait d’un changement dans le futur et sa définition précise ;
- l’analyse de la situation présente et sa comparaison avec le futur voulu ;
- l’identification des étapes à suivre pour y parvenir.

Les trois méthodologies présentées ont un seul but : identifier les points-clés d’un problème afin de structurer la problématique et sa solution. Le fait que le *backcasting* s’insère

parfaitement dans la logique du développement des politiques publiques ainsi que dans la logique de la psychologie comportementale donne un sens aux partisans de l’emboîtement des méthodes pour offrir une meilleure « couverture⁴ » des décisions stratégiques des politiques publiques. Comme le rappelle bien le rapport *Changing Behaviour, A Public Policy Perspective* (2007), de la Commission du Service Public Australien, étant donné que le gouvernement ne peut pas résoudre les problèmes complexes tout seul, l’emboîtement de ces différentes méthodes est une manière d’aborder des problèmes complexes et de laisser le choix final aux utilisateurs tout en les responsabilisant sur les conséquences de leurs choix. Dans ce sens, cette thèse s’inscrit dans la lignée méthodologique des scénarios prospectifs construits selon la logique détaillée dans le schéma suivant :



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 2 Diagramme de construction des scénarios

Comme le montre la figure 2, un premier calcul de la situation dans le présent est fait. Ensuite, un calcul de la situation future tendancielle est réalisé. Enfin, nous effectuons des allers-retours entre les inputs (définis par les politiques publiques et innovations techniques)

⁴ Du point de vue financier comme de celui des impacts

et le résultat. Cette logique d'allers-retours est utilisée afin de mettre en lumière les changements qui devront être opérés pour atteindre à l'objectif du facteur 4 et pour analyser l'impact de chaque changement. Cette logique de construction des scénarios est celle qui est normalement utilisée avec une méthodologie *backcasting* accompagnée par des résultats issus d'une modélisation quantitative. Plusieurs projets de scénarios à long terme peuvent être donnés comme exemple : des scénarios anglais construits par BANISTER (pour les passagers) ou par McKINNON (pour le fret) ; les scénarios européens construits dans le cadre du projet POSSUM ou encore les scénarios français construits par LET-ENERDATA.

1.1.3 La base macroéconomique et la notation formelle du modèle TILT

Une fois définie la méthode à utiliser pour construire la logique des scénarios à long terme, il faut élaborer le modèle quantitatif qui nous permette d'analyser les effets des différentes options des scénarios. Dans ce sens, la construction du modèle qui servira pour la construction des scénarios débute avec le modèle énergétique VLEEM⁵ (Very Long-term Energy Environment Model) construit par ENERDATA dans le cadre d'un projet européen. Comme cette thèse fait partie des recherches LET-ENERDATA, le choix naturel a été de commencer à travailler sur le terrain connu de VLEEM (dont nous expliquerons les origines et le fonctionnement). De ce modèle est né le modèle que nous utiliserons : TILT (Transport Issues in the Long-Term) qui est celui utilisé par ENERDATA et le LET pour la construction de scénarios de développement durable en 2050 pour la France⁶. TILT est un modèle qui permet de prendre en compte les liens existants entre démographie, croissance économique, transport et émissions de CO₂, pour pouvoir fournir des résultats à un horizon lointain. Le modèle TILT permettra de quantifier les scénarios qualitatifs construits grâce à la méthodologie que nous avons décrite.

L'objectif de ce chapitre est double : d'une part, présenter la base macroéconomique de TILT (qui est issue du module BASES de VLEEM) et, d'autre part, présenter la notation formelle UML (Unified Modeling Language) qui sera utilisée pour expliquer clairement le fonctionnement de TILT à travers une notation qui est une norme internationale.

TILT utilise la base développée par ENERDATA dans le cadre du modèle VLEEM. Cette base sert de point de départ pour le développement de TILT et des scénarios de transport de marchandises et de transport de passagers. Comme nous pourrons voir dans les chapitres qui suivent, cinq modules (voir figure. 3) peuvent être identifiés dans TILT :

⁵ Pour plus d'information sur la modélisation de VLEEM, consulter : www.vleem.org

⁶ 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 MEEDDAT). Le rapport final de cette recherche est disponible sur www.let.fr

- module « macroéconomie » ;
- module « transport & infrastructures » ;
- module « micro-comportements » ;
- module « émissions » ;
- module « quantification & analyse des politiques publiques ».

La totalité de ses modules interagissent et possèdent leurs propres caractéristiques. Dans la figure 3, nous pouvons observer la totalité de la structure de TILT. Au fur et à mesure des chapitres de la première partie, nous découvrirons les bases théoriques de chaque module et nous expliquerons leur fonctionnement. De même, nous présenterons les hypothèses faites dans chaque module et nous expliquerons quelles sont les interactions entre chaque élément du modèle TILT.

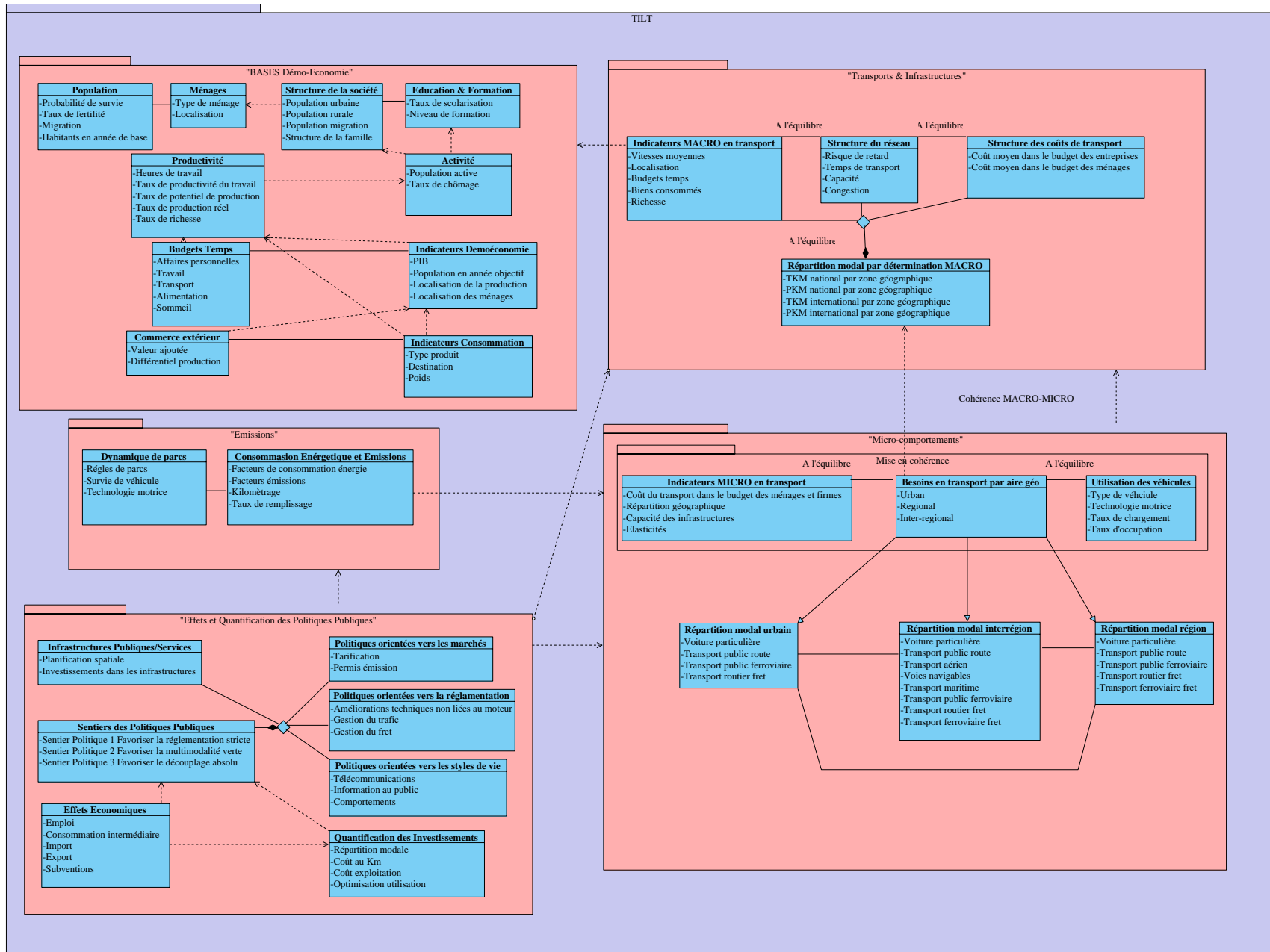


Figure 3 Diagramme du modèle TILT

La totalité du module macroéconomique de TILT est fondée sur les développements faits par le Consortium VLEEM pour mettre en place un modèle qui offre un cadre analytique pour aborder les défis en relation avec le changement climatique. Le modèle VLEEM s'intéresse à cette problématique en combinant deux innovations méthodologiques imposées par l'horizon temporel à long terme :

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

Le fondement théorique derrière le module BASES de VLEEM est que le développement économique à très long terme provient, en grande partie, du facteur humain. Le module BASES suppose que les déterminants de la production, à très long terme, sont la main-d'œuvre et le niveau de formation de la population. La main-d'œuvre est déterminée par rapport à la fertilité moyenne d'une population ainsi que son évolution selon la structure des âges et des ménages. Ensuite, il est supposé que la richesse est produite grâce au travail et au niveau d'information (qui est censé influencer directement la productivité de l'économie). En outre, le module BASES suppose aussi que l'accumulation de la main-d'œuvre qualifiée dans la construction du capital est une conséquence directe de la distribution de la richesse.

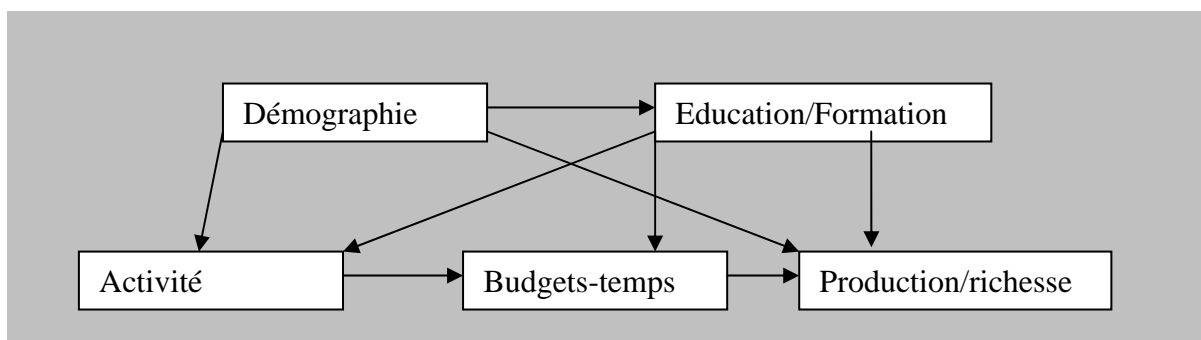


Figure 4 Diagramme simplifié du module BASES de VLEEM (modifié par l'auteur) présenté dans le rapport final VLEEM 2 du Consortium VLEEM.

Ainsi, comme il est montré dans la figure 4, le module BASES se base principalement sur la démographie et sur le niveau de formation de la population pour déterminer :

- le taux de population active ;
- la productivité du travail ;
- les budgets temps.

A partir de ces éléments, les besoins en énergie sont principalement déterminés par rapport à l'utilisation du temps que met la population pour accomplir différentes activités et par rapport à sa richesse. En outre, les besoins énergétiques sont aussi influencés par la structure des âges et les migrations de population. Les facteurs sur lesquels les migrations de population ont une influence directe à l'intérieur du modèle sont :

- le taux de fertilité ;
- le taux de formation ;
- la structure des emplois ;
- la structure de la répartition de la richesse.

En conséquence, le module BASES - à partir de la structure macroéconomique d'un territoire- modélise le développement des besoins énergétiques par activité :

- se nourrir ;
- dormir ;
- développer des activités personnelles ;
- se déplacer ;
- travailler.

En outre, le module BASES modélise le développement de l'économie et de la richesse de sa population, éléments qui permettent de modéliser l'évolution de la consommation des ménages par rapport à leur structure.

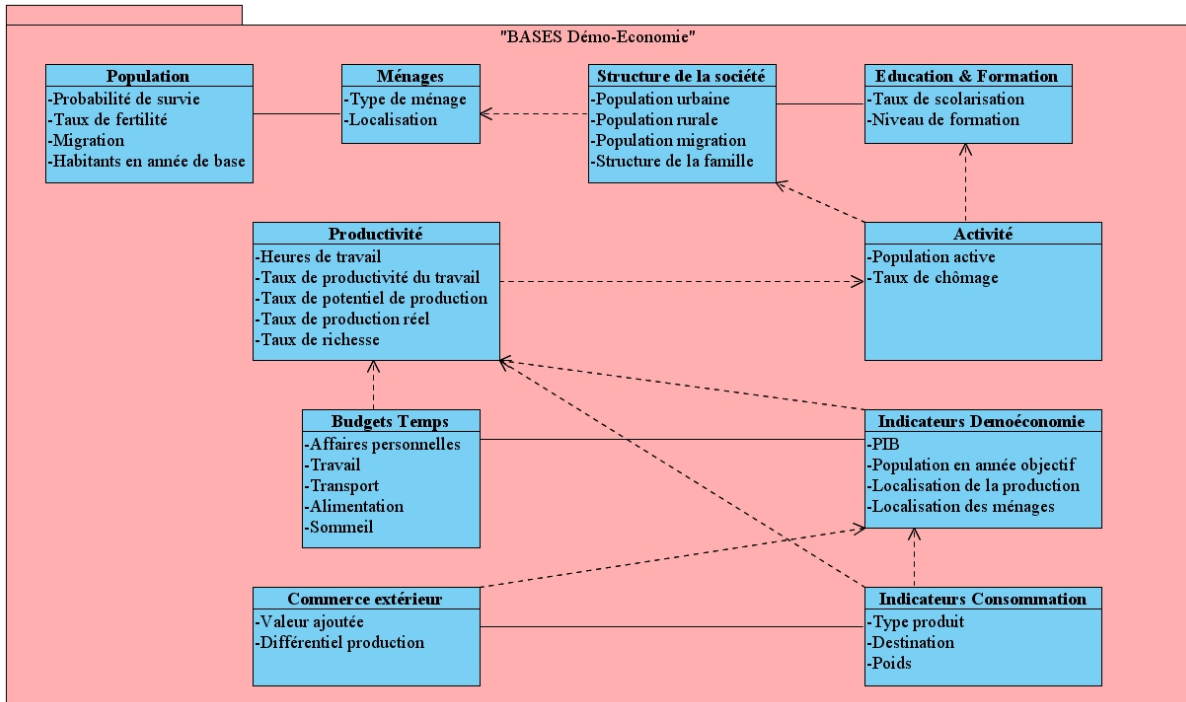
Au fil des chapitres qui suivront, nous montrerons comment les autres modules de TILT sont fortement liés à ces paramètres qui définissent les besoins énergétiques à travers l'utilisation du temps et l'évolution de la consommation.

En outre, la logique inhérente au module BASES de VLEEM est celle que l'on retrouve dans les modèles de croissance endogène, qui sont des modèles macroéconomiques construits sur des fondations microéconomiques. Cette idée de base de croissance endogène que VLEEM modélise nous paraît d'une très grande importance car elle est cohérente avec une conception qui place le progrès technologique comme une variable endogène au cœur du système de développement économique. Cela se révélera grandement utile au moment de modéliser l'évolution des technologies dans les parcs des véhicules et pour intégrer dans notre analyse une planification à long terme mettant en synergie les innovations techniques, les comportements et les politiques publiques.

Dans ce sens, comme nous l'explicitons dans les chapitres suivants, la modélisation des comportements a été réalisée sur une base endogène qui prend naissance dans le module BASES de VLEEM mais en portant un regard renouvelé sur les rapports existant entre le prix du transport, l'évolution des nouvelles technologies et les comportements. De cette manière, les développements de TILT visent à proposer un outil d'analyse des rapports existant entre les politiques publiques, leurs effets et leurs implications au niveau économique.

Dans ce sens, TILT a été construit sur une logique *backcasting* héritée de VLEEM et qui s'adapte parfaitement au processus décisionnel des politiques publiques. Ainsi, le modèle nous permettra de proposer des scénarios qui feront état des différentes possibilités pouvant amener les pouvoirs publics et les entreprises à associer le progrès technique en matière d'environnement à leurs stratégies incitatives afin de répondre aux attentes environnementales de la société.

Sur la base des explications que nous avons données du module BASES, dans la figure 4, nous découvrons le diagramme du module macroéconomique actuel (cf. figure 5) de TILT. Ce diagramme permet d'observer les rapports généraux existants dans ce module.



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 5 Diagramme du module macroéconomie du modèle TILT

Comme nous pouvons l'observer, le module macroéconomie regroupe tout ce qui appartient aux calculs concernant les grands agrégats nationaux que nous avons présentés auparavant (et qui vont servir à déterminer les besoins généraux en transport de l'économie en question). Ainsi, à partir de la population et en fonction de la structure sociétale et des ménages, nous sommes en mesure de disposer d'indicateurs sur la production d'une économie qui serviront à calculer à la fois la richesse de cette économie et sa capacité de production.

A partir de ces éléments, nous serons en mesure de déduire la consommation d'une économie et donc les besoins en transport pour pouvoir produire et consommer. Ces éléments alimenteront les autres modules du modèle TILT afin d'avoir une vision complète et quantifiée des scénarios que nous proposerons dans la deuxième partie de cette thèse. Ainsi, au fur et à mesure des chapitres qui suivent, nous découvrirons le fonctionnement détaillé des modules construits pour développer TILT.

Afin de rendre la compréhension du fonctionnement de TILT à la fois facile et lisible, nous proposerons plusieurs niveaux de lecture. Dans un premier temps, nous allons présenter le

fonctionnement de TILT en utilisant la norme UML⁷ (pour une explication succincte de la norme, se référer aux encadrés⁸ de la page suivante). Puis, dans un deuxième temps, nous détaillerons les relations existant entre les différents modules par des équations. Dans un troisième temps, nous présenterons une description des relations existantes.

Dans les chapitres qui suivent, ainsi que tout au long de la thèse, nous entrerons dans les spécificités des modules construits au fur et à mesure de la recherche LET & ENERDATA. Nous commencerons par analyser le fonctionnement du module transports qui nous permettra d'expliquer la logique inhérente au développement de la mobilité par rapport aux déterminants économiques. A partir de cette base, nous serons alors en mesure d'expliquer comment TILT fait abstraction des infrastructures pour rendre compte des développements du système des transports et de la façon dont cette conception influence les comportements (module microéconomique).

⁷ Pour avoir plus d'informations sur la norme UML le lecteur peut visiter le site : www.uml.org

⁸ Ces explications ont été reprises du livre MULLER & GAERTNER.

Sur la norme UML

La norme UML a été utilisée pour construire des diagrammes de classe qui montrent la composition du modèle et la relation existant entre ses différents éléments. La norme UML permettra aussi les futurs développements du modèle et laissera la porte ouverte à ce que de nouveaux développements, à la fois de raffinement et d'expansion, puissent être réalisés avec une certaine aisance et en respectant une norme qui est un standard international.

Dans les encadrés suivants nous donnerons les deux notions nécessaires pour comprendre la notation UML des diagrammes de TILT. Après les encadrés, nous retrouverons le diagramme UML de TILT. Dans chaque section nous présenterons le diagramme de chaque module.

Deux types de diagrammes seront présentés dans la thèse : les diagrammes de classes et les diagrammes d'activité

- Les diagrammes de classes

« Les diagrammes de classes montrent une abstraction de la réalité, concentrée sur l'expression de la structure statique d'un point de vue général. » Plusieurs éléments seront présents dans chaque diagramme de classes que nous présenterons. En rose nous aurons les paquets qui regroupent différentes classes ; en bleu nous retrouverons les classes. *« Une classe décrit le domaine de définition d'un ensemble d'objets. Chaque objet appartient à une classe. Les généralités sont contenues dans la classe et les particularités sont contenues dans les objets. A l'intérieur de chaque classe nous retrouverons les attributs de chaque classe. Les attributs correspondent aux propriétés de la classe. Ils sont définis par un nom, un type et éventuellement une valeur initiale. »*

- Les diagrammes d'activité.

Ces diagrammes permettent de « *visualiser un graphe d'activités qui modélise le comportement interne d'une méthode (la réalisation d'une opération), d'un cas d'utilisation ou, plus généralement, d'un processus impliquant l'utilisation d'un ou de plusieurs classificateurs. Un diagramme d'activités représente l'état de l'exécution d'un mécanisme, sous la forme d'un déroulement d'étapes regroupées séquentiellement dans des branches parallèles. Le début et la fin (si elle existe) d'un mécanisme sont définis respectivement par un état initial et un état final.* »

Dans les diagrammes, deux types de liens relient les classes et les activités.

Nous verrons que chaque classe et chaque paquet présenté est lié à un autre. « *Les liens particuliers qui relient les objets peuvent être vus de manière abstraite dans le mode des classes de chaque famille de liens entre objets correspond une relation entre les classes de ces mêmes objets. De même que les objets sont des instances des classes, les liens entre objets sont des instances des relations entre classes.* »

- Les lignes pleines sont des associations :

« *L'association exprime une connexion sémantique bidirectionnelle entre classes. Une association est une abstraction des liens qui existent entre les objets instances des classes associées.* »

- Les lignes pointillées sont des relations de dépendance :

« *Les relations de dépendance sont utilisées lorsqu'il existe une relation sémantique entre plusieurs éléments qui n'est pas de nature structurelle. Une relation de dépendance définit une relation unidirectionnelle entre un élément-source et un élément-cible. Elle indique qu'un changement au niveau de la cible implique un changement au niveau de la source.* »

Chapitre 2 Le lien entre les besoins macroéconomiques et la sphère microéconomique : Le module « Transports & Infrastructures » dans TILT

1.2.1 La définition des besoins en matière de transports

Plusieurs études préconisent le couplage entre activité économique et transport. Par exemple, pour A. SCHAFER (2001), des changements cycliques dans l'activité domestique et internationale ont un impact fort sur la mobilité des personnes et des marchandises. Cet impact a ensuite un effet sur les infrastructures et les services de transport. La croissance économique amène le développement commercial, accroît les déplacements et les échanges. Cela crée subséquemment de la congestion et des pressions sur la capacité des infrastructures. Dans ce chapitre, nous analyserons comment cette liaison entre développement économique, transport et infrastructures est prise en compte par le modèle TILT.

Comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent, dans le module macroéconomique, les principaux déterminants de développement économique sont la population, la richesse, le niveau de connaissance et l'organisation de la société. A partir de ces éléments, le module « Transports & Infrastructures » cherche à modéliser le fait que plus la population est riche, plus elle sera équipée avec des véhicules privés et, en outre, plus elle disposera des moyens « d'acheter » de la vitesse.

Par ailleurs, plus les personnes seront riches, plus la valeur des marchandises qu'elles achètent sera importante, ce qui poussera à une augmentation du coût de l'immobilisation, qui se traduira par une recherche d'accroissement des vitesses dans le transport de marchandises.

En s'emparant de cette logique, le module « Transports & Infrastructures » utilise les associations existant entre les agrégats macroéconomiques, les besoins en transport, la structure du réseau de transport et la structure des coûts du transport pour définir des mesures agrégées de transport se référant à chaque zone géographique. Grâce à ces deux modules, nous définissons les besoins en matière de transport au niveau urbain, régional, interrégional, européen et extra-européen.

La logique inhérente aux calculs opérés dans ces deux modules prend naissance dans le constat d'une croissance des passagers kilomètres (PKM) année après année. Plusieurs auteurs lient cette croissance à la constance des BTT (Y. ZAHAVI, 1981) qui, avec l'augmentation de la vitesse, se traduit par une augmentation des distances parcourues (CROZET & JOLY, 2004). En d'autres termes, l'idée d'un couplage PIB-vitesse et non pas seulement PIB-transport est l'explication avancée par plusieurs études au niveau international (SCHAFER & VICTOR, 2000) et au niveau national (CROZET & JOLY, 2004). Parallèlement, la représentation du transport de marchandises dans TILT donne à la vitesse une dimension très importante dans la détermination des besoins en transport. La logique repose sur le constat d'une relation implicite entre l'accroissement de la valeur par tonne des marchandises transportées et la vitesse à laquelle ces marchandises sont acheminées. Ces constats ont été relevés, entre autres, en France par LOPEZ-RUIZ & CROZET (2006), en Angleterre par McKINNON (2007) ou encore, au Danemark, par FOSGREAU (2004).

La logique de base de TILT repose sur le fait que l'augmentation de la mobilité des passagers (km/capita/année) et des marchandises (km/tonne/année) est une conséquence directe de l'augmentation de la vitesse moyenne dans les transports (rendue possible par le développement des infrastructures et par l'optimisation de leur utilisation). De cette manière, les rythmes de saturation des différents modes de transport peuvent être modifiés par des changements sur l'élasticité vitesse/PIB afin de faire apparaître un découplage (plus ou moins rapide) entre croissance économique et mobilité personnelle. En d'autres termes, l'augmentation de la vitesse moyenne de transport, soit l'augmentation de la mobilité, peut

être découplée de la croissance économique en passant par une organisation différente du système des transports et par des changements dans les comportements des acteurs économiques.

Avant de développer cette représentation au niveau des services de mobilité dans le modèle TILT, il convient de revenir sur les fondements de cette modélisation et de les approfondir. La logique que nous évoquons trouve sa base théorique dans les modèles macroéconomiques qui expliquent les rapports existant entre une économie globalisée et des économies nationales. Dans cette lignée nous retrouvons essentiellement les idées développées à partir des années 90 dans un nombre croissant d'études analysant l'influence de l'économie globale sur le transport au niveau national en prenant en compte le taux d'inflation, l'emploi, les salaires et la valeur ajoutée.

Dans l'analyse macroéconomique sur les déterminants de l'inflation domestique de BORIO & FILARDO (2007), les auteurs observent que, depuis dix ans, l'inflation au niveau mondial augmente de manière plus faible qu'avant et est moins sensible qu'auparavant aux excédents des inputs et à leur augmentation de coût. Sur cette base théorique, ils explorent l'hypothèse selon laquelle une intégration économique plus importante aurait pu contribuer à la baisse de l'inflation que nous avons observée depuis dix ans.

- Pour réaliser leur analyse, BORIO et FILARDO se focalisent, en particulier, sur le possible changement dans les déterminants du processus d'inflation, qui sont passés, selon eux, d'une spécificité domestique à des facteurs globaux. Ils expliquent deux approches différentes qui ne diffèrent pas sur le mécanisme fondamental du processus d'inflation mais sur la manière dont la conception des frontières nationales est traitée. D'une part, ils expliquent l'inflation par une approche centrée sur le pays, qu'ils perçoivent comme un système *bottom-up* du processus de l'inflation qui peine à montrer les facteurs internationaux et globaux, considérés comme exogènes ; d'autre part, ils expliquent l'inflation par une approche centrée sur le monde qui rend compte du processus d'inflation d'une manière *top-down*, en se focalisant sur les facteurs internationaux et globaux. A partir de ces deux approches, ils concluent que la baisse de l'inflation a été la conséquence du processus de globalisation qui a permis une sensibilité accrue des rapports économiques domestiques aux

influences externes ainsi qu'une modération plus importante des salaires en même temps qu'augmentait le nombre des délocalisations d'entreprises et la mobilité de la main-d'œuvre.

Pour ces auteurs, la logique économique est extrêmement importante pour comprendre les rapports existant entre l'économie internationale, l'économie nationale et les besoins en matière de transport, que ce soit pour les passagers ou pour les marchandises.

Si nous reprenons les thèses de ces auteurs, il en résulte que la division internationale du travail a largement contribué à une situation d'inflation, au niveau global, relativement faible. Celle-ci est soutenue grâce à l'intensité ouvrière des pays en développement, qui proposent au monde un stock presque inépuisable de main-d'œuvre rémunérée avec des salaires relativement bas. Ce stock pousse à la baisse les prix de production des produits intensifs en main-d'œuvre à la baisse et concurrence la main-d'œuvre non-qualifiée des pays développés. Cette concurrence augmente l'emploi dans les pays en voie de développement, ce qui entraîne une hausse des salaires dans ces pays et donc de la consommation. L'augmentation de la consommation dans les pays en voie de développement ne pose pas un problème tant que la nouvelle demande (créée par la nouvelle richesse des pays en voie de développement) est en phase avec l'offre. En revanche, dès que cette demande est excédentaire (au niveau global), les prix sont poussés vers le haut au niveau mondial. Néanmoins, dans cette situation, l'inflation ne connaît pas de mouvements rapides et intenses mais plutôt un mouvement stable accompagné par des variations moins importantes qu'auparavant.

De ce fait, la pression exercée sur les économies des pays développés est double : l'accroissement de la concurrence au niveau international pousse les pays industrialisés à rechercher une productivité accrue dans un climat de hausse des prix mais, étant donné que le fait de rendre une économie plus productive en diminuant les salaires peut se révéler très dangereux, la recherche d'une productivité accrue passera par la spécialisation des pays industrialisés dans la production à haute valeur ajoutée.

En d'autres termes, dans une situation de développement normale, une économie est incitée à développer une stratégie globale de recherche de productivité en investissant en formation et

en éducation. Ce mouvement d'adaptation à l'économie globale a eu et continuera de générer trois effets⁹ principaux :

- le maintien de la croissance économique ;
- l'augmentation des salaires ;
- l'augmentation de la valeur ajoutée des marchandises.

Ces explications nous permettent d'aller dans le sens d'un lien entre le développement économique d'un pays et la mobilité, notamment du fait que, comme nous l'avons vu en début du chapitre, plusieurs auteurs sont d'accord pour dire que ces effets sont d'une très grande importance pour expliquer la relation existant entre l'activité économique et le transport car, historiquement, il existe une croissance de la mobilité des personnes couplée à leurs revenus et une croissance de la mobilité des marchandises couplée à la croissance de leur valeur ajoutée.

Ces accroissements, rappelons le, sont le fruit de l'activité économique et des offres de vitesse accrue, c'est à dire d'un glissement progressif du choix modal vers des modes plus rapides (la route, le TGV ou l'avion¹⁰).

Ainsi, en même temps qu'augmentent les revenus des personnes et la valeur ajoutée des productions, la valeur du temps augmente aussi. Ainsi, au fur et à mesure que l'économie croît, la nature de la demande de mobilité des passagers et des marchandises est modifiée en cherchant à minimiser les temps d'immobilisation. De cette manière, avec la hausse des revenus, la demande en vitesse s'est accrue de manière soutenue (A. SCHAFER, 2009).

Par conséquent, nous sommes à même de dire que le fait que les pays développés voient certaines de leurs entreprises se délocaliser n'est pas une mauvaise chose en soi. En effet, ce renouveau de l'économie pousse les autorités publiques à rechercher une productivité accrue en investissant dans l'éducation, la recherche et les infrastructures, ce qui augmente la richesse d'un pays et de ses habitants. Cette stratégie incarne la raison principale pour laquelle au lieu de songer à une non-croissance, il faut réfléchir (et c'est bien le but des scénarios de

⁹ Les idées économiques présentées correspondent aux théories de croissance endogène mais en intégrant les critiques faites sur la capacité des modèles de croissance endogène à expliquer les influences de l'extérieur.

¹⁰ Dans les chapitres, à venir la modélisation des ces choix seront présentés.

cette thèse) à une stratégie qui puisse répondre aux critères de soutenabilité internationale tout en s'insérant dans une stratégie globale en harmonie avec les stratégies européenne et mondiale.

Pour ce faire, il faut prendre en compte les choix des personnes sur la façon de dépenser leur richesse ainsi que les conséquences que ces choix impliquent sans qu'elles soient privées de leur liberté de mobilité. Ainsi, dans ce module, sur la base de l'activité économique déterminée dans le module BASES et de la logique qui a été expliquée, nous déterminons les besoins en transport pour les différentes échelles géographiques de la France. Cette détermination de besoins généraux en transport contient trois éléments essentiels du transport, définis dans le module « macroéconomique »:

- la localisation des ménages et leur structure ;
- la localisation des entreprises ;
- la richesse de l'économie.

Cependant, la détermination des besoins généraux en services de transport requiert de plus de précision, afin d'être capables d'intégrer, dans la modélisation, les effets des infrastructures de transports ainsi que la configuration du réseau. Cette planification passe par l'analyse du lien existant entre l'activité économique et la mobilité, c'est à dire les infrastructures considérées dans leur rôle de support de l'activité économique.

Selon SCHAFER, la mobilité des passagers et le revenu *per capita* sont directement reliés, mais deux éléments jouent un rôle important quant au mode utilisé pour se déplacer. D'une part, faut tenir compte du coût du transport et, d'autre part, de l'accessibilité que les différents modes proposent. A ce sujet, nous voyons apparaître plusieurs problématiques liées aux arbitrages des ménages en relation avec leur mobilité et leur localisation (que nous traiterons dans les chapitres suivants). L'une de ces problématiques est celle du support de la mobilité (les infrastructures), de sa performance (l'accessibilité), de son coût d'utilisation et de son lien avec les infrastructures mobiles (voitures, transports en commun).

C'est au cœur de cette logique explicative de l'inflation que s'inscrit TILT, et c'est ce raisonnement qui nous permet d'ouvrir la voie à l'analyse de ce que nous considérons être un

lien cohérent entre l'activité économique, le transport de marchandises et le transport de passagers : ce lien établit la relation existant entre l'expansion du marché d'une économie, - qui ouvre la porte à la possibilité d'avoir une croissance importante du potentiel de production de l'économie globale - et la croissance de la valeur ajoutée, des salaires et, par conséquent, de la mobilité des personnes et des marchandises.

Raisonné sur la base de l'inflation comme déterminant des salaires permet à TILT de trouver un cadre macroéconomique cohérent facilement adaptable à des changements allant dans le sens de la mondialisation.

1.2.2 La prise en compte des infrastructures dans la modélisation

LAKSHMANN & ANDERSON (2004) établissent que la modélisation macroéconomique des infrastructures de transport est sous-spécifiée et incapable d'incorporer les liens-clés entre transport et infrastructures. Pour eux, l'essentiel des infrastructures de transports réside dans le fait qu'elles constituent un réseau et ils considèrent que la modélisation macroéconomique sous-estime les effets de réseau et leur influence sur le transport. Pour nous, prendre en compte les effets des infrastructures revêt une importance particulière. Nous nous insérons dans le cadre des études comme celles de TILLEMA, ETTEMA & van WEE (2005), qui analysent la probabilité des changements dans la localisation des ménages faisant suite à des changements sur la tarification des infrastructures ou encore se situant dans le cadre des études de WHITEHEAD, PRESTON & HOLVAD (2005), qui analysent les impacts, sur le chiffre d'affaires des entreprises, d'une augmentation de la tarification des infrastructures. Ils montrent que la relation entre les politiques publiques, le transport, les infrastructures et la localisation est très importante. Le cadre analytique dans lequel se situent ces études met en avant le fait que les infrastructures sont un support pour l'activité économique et permet également de faire le lien avec une conception des infrastructures envisagées comme le support du mouvement. Susan HANDY, dans son article *Accessibility vs. Mobility* (2002), conçoit le mouvement comme un vecteur de libertés qui dépend des infrastructures, du coût du transport et des localisations (où mobilité et accessibilité ne sont pas forcément conciliables). Dans ce sens, nous sommes amenés à considérer la mobilité comme un bien irremplaçable et nécessaire pour réaliser nos activités et transporter nos marchandises.

Dans TILT, les infrastructures sont approchées comme le support de différentes activités. La modélisation TILT détermine l'activité économique qui est ensuite réalisée sur les infrastructures existantes (et qui, de ce fait, sont en relation directe avec l'activité d'un pays). La suffisance ou l'insuffisance des infrastructures aura une incidence sur l'ensemble du système et fera partie intégrante de l'analyse des politiques publiques -en matière de transport. De cette manière, nous définirons, à travers les déterminants macroéconomiques, la répartition modale pour chaque aire de service par rapport aux besoins en matière de

transport. Cette répartition se fera en associant les déterminants du transport avec les besoins par échelle géographique et les données concernant l'utilisation des véhicules et des infrastructures.

Comme nous considérons que le dénominateur commun entre le transport des marchandises et des passagers est l'utilisation commune des infrastructures, nous sommes amenés à nous poser deux questions : celle de la tarification des infrastructures et celle de la congestion. Ces deux éléments, à leur tour, nous conduisent à nous poser la question de l'influence des infrastructures sur le partage modal ainsi que sur le coût, en temps et en argent, des différentes options de transport. Ainsi, la congestion et/ou la décongestion des infrastructures influence non seulement l'utilisation de ces mêmes infrastructures et le report modal dans un système de transports mais également l'utilisation des véhicules et, par conséquent, leur achat (et réciproquement, car les déterminants pour l'achat de véhicules et le coût de leur utilisation influencent également l'utilisation des infrastructures).

Pour répondre à ces questions (qui seront développées dans les deux chapitres suivants) nous devons, tout d'abord, analyser quelle est celle qui sous-tend la détermination de la nature du service de transport selon la configuration du réseau et du système spatio-temporel. Ensuite, nous définirons la façon dont se font, à l'intérieur de chaque échelle géographique, les arbitrages spécifiques à l'utilité de l'accessibilité et ce, afin de déterminer les choix modaux des personnes et des entreprises.

A partir de là, nous avons cherché à établir une logique de modélisation qui puisse nous permettre de faire apparaître les arbitrages par rapport au coût du transport et à l'utilité que ce dernier rapporte. Ainsi, nous avons développé une logique dans laquelle nous pouvons introduire les notions de distance, de vitesse, de coût de transport (par rapport au temps, au carburant, carbone, etc.) dans une logique de minimisation des effets négatifs et de recherche d'efficacité, tout en prenant en compte la congestion du réseau.

Pour réaliser cette analyse, nous décomposerons la notion d'infrastructures en deux catégories :

- les infrastructures mobiles, qui concernent les véhicules, les avions, les barges, les bateaux, etc. (la prise en compte de ces infrastructures est couplée directement à la possibilité de réaliser des mouvements) ;
- les infrastructures fixes (dans le sens où les routes, aéroports, lignes ferroviaires et autres doivent être prises en compte afin de rendre visible la notion de congestion sur les réseaux et les effets de cette congestion).

Dans ce chapitre nous nous concentrerons uniquement sur les infrastructures fixes. La modélisation concernant les infrastructures mobiles sera présentée en détail dans le chapitre « émissions et technologies ». Néanmoins, ce module, ainsi que celui des « émissions et technologies », interagira fortement du fait de la dépendance existant -que nous avons évoquée au début de ce chapitre- entre les infrastructures mobiles et fixes.

Afin de rendre compte des effets des infrastructures sur le système de transport modélisé par TILT, nous avons souhaité utiliser une base de modélisation qui puisse apporter une vision de l'accessibilité conditionnée par l'utilité que celle-ci apporte tout en prenant en compte les caractéristiques du réseau, le coût d'utilisation et les effets de la congestion. Nous avons trouvé une réponse appropriée dans les « algorithmes de fourmis », qui mettent en avant tous ces éléments et permettent d'intégrer les effets d'apprentissage et les influences des technologies d'information dans les déplacements. En outre, nous pouvons aussi faire apparaître des arbitrages entre la valeur du déplacement et l'allongement du déplacement.

En plus des raisons citées auparavant, ce type d'algorithmes est particulièrement adapté aux besoins de la thèse pour plusieurs raisons :

- ils nous permettront de combiner le caractère prédictif des algorithmes pour les utiliser dans une optique de *backcasting* ;
- ils faciliteront les développements futurs du modèle TILT, qui vont dans le sens d'une régionalisation des calculs. Celle-ci permettra l'utilisation de données plus fines et, en conséquence, demandera des méthodes de calcul plus performantes. Ce genre d'algorithmes est très flexible et adaptable à une utilisation sur des données agrégées comme sur des données désagrégées.

- ils permettront que l'on conserve une structure cohérente de modélisation entre les infrastructures et les aspects socio-économiques afin d'expliquer la relation entre le transport et les innovations technologiques.

Dans ce sens, FAUDRY & CHANARON (2003) écrivent que les sciences sociales tentent de répondre à des questionnements de nature différente quant à l'innovation dans les transports. Ces questionnements convergent vers deux problématiques principales :

- la capacité des innovations à résoudre les problèmes de nuisances ;
- la capacité des innovations à enrayer l'irrésistible montée en puissance des modes de transport individuels.

Nous constatons que ces deux problématiques impliquent une réflexion à plusieurs niveaux : les problèmes environnementaux liés au GES, l'utilisation de l'espace, la consommation de carburant, les impacts économiques, etc. Comme nous le montrerons un peu plus loin, les algorithmes permettent de faire interagir simultanément plusieurs aspects du transport et de proposer une vision claire des arbitrages en jeu. La flexibilité des algorithmes de fourmis nous permettra d'observer ce que l'aspect social et l'aspect technologique devront implémenter pour accompagner les solutions envisageables à long terme.

Dans ce cadre, la modélisation des infrastructures revêt une importance toute particulière car il faut que les politiques sociales et les politiques technologiques aient une conception semblable (voire identique) au niveau de la modélisation propre aux outils d'aide à la décision. Par exemple, pour planifier le déploiement des services à bord des véhicules (qui vont dans le sens d'une amélioration de la sécurité, de la rentabilité du temps passé dans les transports, de l'optimisation des consommations –en temps et carburant-), il faudra que les outils d'aide à la décision utilisés pour la prospective et la planification soient capables de faire apparaître très nettement les relations existant entre les éléments sociaux et technologiques.

La nature et les sciences sociales

Les algorithmes de colonies de fourmis sont des algorithmes qui s'inspirent du comportement des fourmis pour trouver des solutions optimales à différentes types de problèmes, dont le transport. Initialement, ces algorithmes ont été proposés par Marco DORIGO pour la recherche de chemins optimaux.

Les modèles « ant-class » sont particulièrement adaptés pour ce genre de prospective car ils sont basés sur une table de décisions sur le déplacement à un certain nœud qui est obtenue par la composition de valeurs des sentiers de phéromones définies comme suit :

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

Où $\tau_{ij}(t)$ est la quantité de phéromone sur l'arc (i,j) à l'instant t. $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$ est le coût pour se mouvoir (inverse à la distance) du point i au point j. N_i est le set des voisins du point I, et α et β sont deux paramètres qui contrôlent le poids relatif du sentier de phéromone et la valeur du déplacement. La probabilité avec laquelle un agent K choisit un déplacement d'un point i à un point j est :

$$p_{ij}^k(t) = \frac{a_{ij}(t)}{\sum_{l \in N_i^k} a_{il}(t)}$$

Le rôle de α et β est le suivant : Si $\alpha = 0$, les points les plus proches ont une probabilité plus grande d'être choisis. Si au contraire $\beta = 0$, le choix se porte sur les phéromones. Cette méthode donnera lieu à des phénomènes de stagnation qui mèneront à une situation sub-optimale. Un arbitrage entre valeur et intensité du sentier paraît donc nécessaire.

Une fois que toutes les fourmis ont achevé leur tour, commence l'évaporation des phéromones sur les arcs. Alors que chaque fourmi dépose une quantité de phéromones $\Delta T_{ij}^k(t)$ sur chaque arc qu'elle a utilisé, peu à peu les phéromones vont disparaître jusqu'au moment où le sentier sera fermé (car il n'y a plus d'utilité à l'emprunter) :

$$\Delta T_{ij}^k(t) = \begin{cases} 1/L^k(t) & \text{si } (i, j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin T^k(t) \end{cases}$$

Où $T^k(t)$ est le tour fait par la fourmi k à l'itération t , et $L^k(t)$ est la longueur.

De plus, l'addition des phéromones par les fourmis et l'évaporation des phéromones sont implémentés par l'application de la règle suivante sur tous les arcs :

$$T_{ij}(t) \leftarrow (1 - p)T_{ij}(t) + \Delta T_{ij}(t)$$

Une fois que l'entrée aura été mise à jour, la valeur de l'intensité de la phéromone de toutes les entrées relatives à la destination s se dégrade. La dégradation des phéromones correspond à l'évaporation de la phéromone. Dans ce cas, le facteur de dégradation est de $1/(1 + \Delta T^k(t))$, de façon que cela opère comme une normalisation des valeurs de l'intensité de la phéromone qui continuent à être utilisables comme des probabilités :

$$T_{ins}(t) \leftarrow \frac{T_{ins}(t)}{(1 + \Delta T^k(t))}, \forall n \in N_i$$

La valeur de $\Delta T^k(t)$ varie suivant l'âge de la fourmi. Les fourmis vieillissent après chaque passage par un nœud et sont virtuellement retardées dans les nœuds en fonction de la capacité du nœud. Par ce mécanisme, la quantité de phéromone déposée par une fourmi est inversement proportionnelle à la longueur et au degré de congestion du chemin sélectionné.

Afin de rendre ces algorithmes utilisables dans une logique de construction de scénarios en utilisant le *backcasting*, nous avons dû les adapter. Tout d'abord, dans la modélisation de TILT, la même logique est utilisée pour le transport de passagers et pour le transport de marchandises. Le motif de ce choix est de faire apparaître des influences sur le transport de marchandises par rapport aux changements de comportement dans le transport de passagers et réciproquement. Le lien entre ces deux activités est réalisé par l'utilisation des infrastructures. Ensuite, nous avons choisi de créer des fourmis motorisées qui ont un comportement moyen.

Ainsi, nous aurons des fourmis motorisées (train, voiture, avion, bateau), qui effectueront des voyages à des distances et des vitesses différentes avec un coût différent selon la table de décisions définie par :

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

Équation 1

Chaque fourmi nous fournira les informations nécessaires pour comparer l'utilité de chaque mode de transport à différentes distances afin de pouvoir calculer la probabilité existante pour accomplir un trajet sur un mode ou sur un autre de transport.

$$p_{ij}^k(t) = \frac{a_{ij}(t)}{\sum_{l \in N_i^k} a_{il}(t)}$$

Équation 2

Ces algorithmes nous permettent d'introduire l'idée de distance tout en prenant en compte la congestion sur le réseau dans un espace donné, les vitesses, le coût généralisé du transport (qui peut être éclaté en différents composants : temps, carburant, carbone, etc.) dans une logique de minimisation de coût et de maximisation de l'utilité.

Dans notre modèle $\tau_{ij}(t)$ représente le niveau et la qualité de l'offre de service du transport par mode, qui est influencée par la congestion des infrastructures (soit le marquage par phéromones) sur l'arc (i,j) à l'instant t. L'utilité pour se mouvoir du point i au point j, est

inversement proportionnelle au coût généralisé de transport. N_i est le set de voisins du point I et α et β sont deux paramètres qui contrôlent le poids relatif de l'offre et de l'utilité que un déplacement représente.

$$\eta_{ij} = \frac{\text{opportunité}}{\text{coût}}$$

Équation 3

Ainsi, l'utilité de se mouvoir sera déterminée par la relation existant entre l'opportunité et les coûts liés à la réalisation de cette opportunité par rapport à chaque mode. L'opportunité est déterminée en fonction de l'accessibilité utile qui dépend du temps de transport, du coût d'un mouvement et de l'utilité liée au mouvement. 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 mouvement représente une utilité et a un coût qui est fonction de l'opportunité que chaque déplacement représente et du coût généralisé de transport.

Hypothèses générales se référant à ce module

Dans les scénarios que nous construirons, l'opportunité que propose un déplacement est supposé stable dans le temps. En d'autres termes, nous ne remettons pas en cause l'utilité des déplacements, et nous supposons qu'un déplacement garde la même utilité sur toute la période.

Les coûts de déplacement ont été calculés sur la base des dépenses en consommation de transport. Chaque poste de dépense a été ventilé suivant le mode et l'échelle géographique. De même, les dépenses de réparation des VP et les coûts d'assurance ont été pris en compte dans ce calcul.

En ce qui concerne les coûts de transports des marchandises, nous avons utilisé les productions des branches pour ventiler les coûts selon les modes et les échelles géographiques.

Cette approximation des coûts de transport par les dépenses en consommation et par la production de la branche se révèle très utile pour deux raisons :

- elle rend possible d'établir des comparatifs entre les différents modes ;
- elle permet de calculer les impacts des changements dans la demande sur l'ensemble de l'économie.

Ainsi, en remplaçant la distance (qui est le facteur déterminant pour le choix des fourmis) par le coût généralisé des différents modes de transport, nous assimilons la multiplicité des sentiers des fourmis (dans la version originale de l'algorithme *ant-class*) à un sentier avec plusieurs modes. De la même manière que les fourmis choisissent leur sentier par rapport à une table de probabilités, notre modèle calcule la probabilité avec laquelle un agent K choisit tel ou tel mode de transport pour réaliser un déplacement sur un certain sentier défini. Dans ce sens, nous aurons des sentiers différents qui représenteront chaque échelle géographique. De plus, les modes de transport seront en concurrence sur ce sentier. La probabilité que l'agent K aura de choisir un mode plutôt qu'un autre sera fonction du rapport accessibilité /coût propre à chaque mode et sur chaque échelle géographique par rapport au niveau général du réseau de transport dans son ensemble.

Comme nous l'avons évoqué, le modèle TILT étant un modèle de comportement moyen, nous considérons qu'il y a un agent représentatif qui effectue un déplacement moyen urbain, un déplacement moyen régional et un déplacement moyen interrégional sur différents modes, et il a une probabilité d'utiliser un certain mode de transport selon l'utilité, le temps de transport, le coût et la congestion du réseau.

Cette équation prend en compte les caractéristiques de la position de l'agent K ainsi que du nœud vers lequel il souhaite se déplacer. Elle prend en compte également l'offre de transport entre le nœud i et j , la vitesse des différents modes de transport desservant les nœuds et, par conséquent, les coûts associés au déplacement. Ces facteurs sont pris en compte pour calculer la probabilité que l'agent K a de choisir un mode plutôt qu'un autre pour un déplacement donné. Ainsi, sur un déplacement en longue distance, en fonction du coût de déplacement et de la distance à parcourir, l'agent pourra choisir l'avion, le train, la voiture ou le car. Il est clair que, sur un déplacement Paris-Athènes, il y a de fortes chances pour que le mode de transport choisi soit l'avion.

Comme nous pouvons l'observer dans l'équation 1, les poids des facteurs utilité et congestion sont déterminés par α et β . Leur rôle est le suivant : Si $\alpha = 0$, nous éliminons le poids du facteur « utilité » de l'équation, le seul motif utilisé pour choisir un déplacement sera celui du niveau de congestion du réseau. Si au contraire $\beta = 0$, le poids du facteur infrastructures est éliminé, le seul facteur retenu pour prendre la décision de faire un déplacement sur un mode

ou sur un autre est celui de l'utilité du déplacement (qui dépend du temps d'accès, du coût et de l'opportunité).

Dans TILT, nous avons un « sentier de phéromones » qui sera déterminé par un indicateur sur l'état du réseau, qui est unique et applicable à tous les modes : le taux de retard proposé par chaque mode sur chaque arc. Ainsi, outre le choix fait par l'agent au niveau de l'offre de vitesse proposé par chaque mode, le taux de retard aura une influence sur le choix et sur la performance du mode de transport. Le « sentier de phéromones » se présente de la façon suivante :

$$\tau_{ij}(t) = TR(t)$$

Équation 4

$$T_{ins}(t) \leftarrow \frac{TR_{ins}(t)}{(1 + \Delta TR^k(t))}, \forall n \in N_i$$

Où TR est le taux de retard.

Le taux de retard est pris dans le sens de la notion de congestion du réseau avancée par le *NCHRP Report 398*, dans ROBITAILLE et NGUYEN (2003), qui définit la congestion comme le temps de parcours qui excède celui encouru normalement dans des conditions de circulation en écoulement libre.

De ce rapport, nous reprenons la formule du taux de retard comme suit :

$$TR = TDR - TDA$$

Équation 5

TDR est le taux de déplacement réel et TDA est le taux de déplacement acceptable. Le TDR et le TDA sont déterminés de la manière suivante :

$$TDR = \frac{BTT_{alloué}}{\text{longueur du segment}}$$

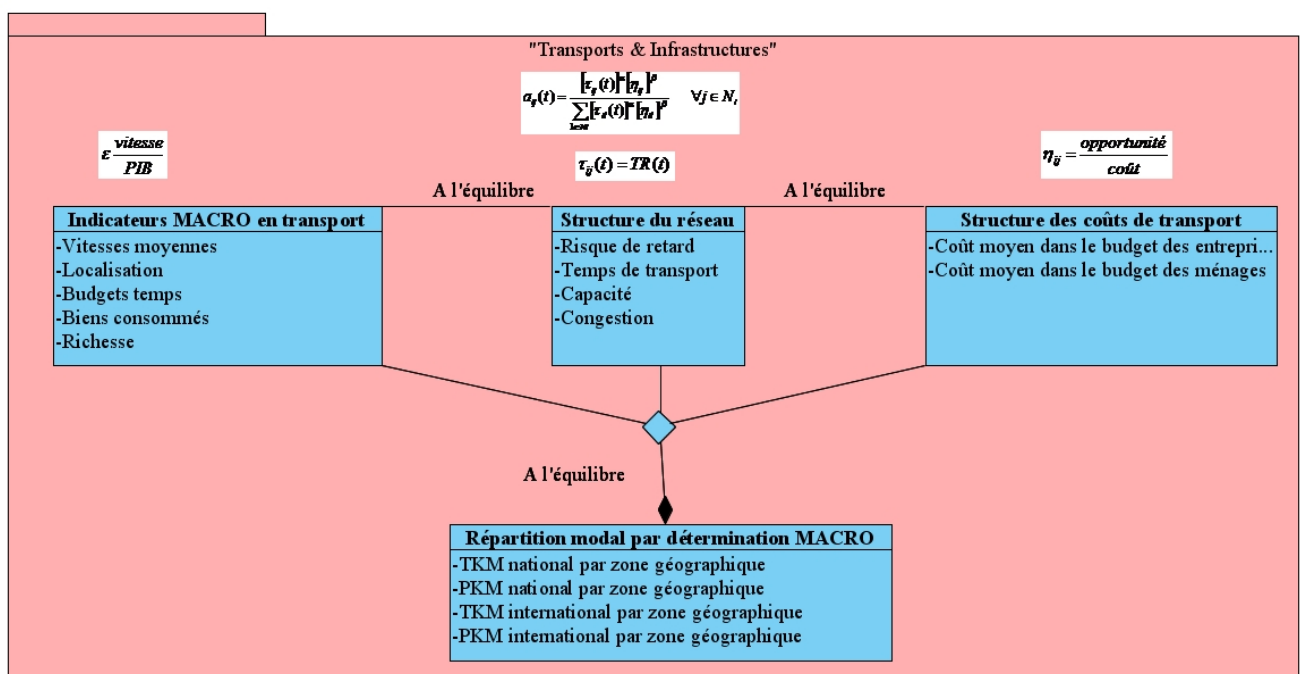
Équation 6

$$TDA = \frac{60(\text{min})}{\text{vitesse moyenne}}$$

Équation 7

La notion de taux de retard permet à la fois de donner une importance redoublée à la vitesse proposée par chaque mode et permet en outre de faire ressortir les effets de congestion sur un réseau. En outre, la notion de taux de retard permet de faire une comparaison entre tous les modes qui soit indépendante des différences sur les infrastructures propres à chaque mode et qui offre une approche centrée sur l'utilisateur.

Dans la figure 6, nous retrouvons le diagramme de classes qui explique les relations existantes entre les différents éléments de ce module.



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 6 Diagramme du module Transports

Après l'analyse de ce module, nous avons une notion claire des répartitions modales et, par conséquent, des besoins en matière d'infrastructures. Ce module est fortement lié à la quantification des investissements nécessaires pour la configuration de chaque scénario.

Hypothèses sur le calcul en matière d'investissements.

Ce calcul est fait sur la base d'un taux d'utilisation des infrastructures qui est supposé connaître une optimisation de 15% par rapport à l'année de base. De ce fait, ce qui est calculé est le nombre de kilomètres d'infrastructure qui seraient nécessaires sur la base des trafics propres à chaque scénario.

Ce nombre de kilomètres supplémentaires est ensuite multiplié par un coût moyen de construction au kilomètre :

- 5 millions d'euros par kilomètre d'autoroute ;
- 1 million d'euros par kilomètre de route locale ;
- 12 millions d'euros par kilomètre de ligne ferroviaire ;
- 30 millions d'euros par kilomètre de TCSP.

Les besoins en matière d'investissement sont calculés en dehors des coûts supplémentaires d'exploitation.

Chapitre 3. Les contraintes microéconomiques : Le module « Micro-comportements » dans TILT

Le module des « micro-comportements » résume les arbitrages qui jouent au niveau des décisions microéconomiques sur la réalisation du transport. Dans cette section, nous expliquerons comment nous avons modélisé ces déterminants microéconomiques en utilisant les résultats fournis par les autres modules du modèle. Ainsi, nous analyserons le lien existant entre les agrégats macroéconomiques, les infrastructures, et les micro-comportements.

1.3.1 Les arbitrages dans la mobilité des personnes

Dans ce chapitre, nous prenons en compte le développement des transports comme une suite d'arbitrages qui se font à travers le budget des ménages consacré au transport par rapport aux besoins en mobilité pour réaliser leurs activités. Ainsi, dans TILT, il existe des arbitrages entre les différents modes selon l'échelle géographique mais, en prenant en compte que chaque échelle géographique appartient à un espace physique parcouru par des infrastructures. Celles-ci ont à la fois un coût d'utilisation et une réglementation d'utilisation qui influe sur le coût du transport ainsi que sur la vitesse sur le réseau.

En outre, nous retrouvons en toile de fond de ces arbitrages une réalité où l'économie globale a une incidence sur les besoins futurs en matière de transport de marchandises et de passagers, qui sont intimement liés aux interactions économiques et géostratégiques existant entre les différents pays du monde.

Ainsi, le budget des ménages est défini comme suit :

$BM = BM_1 + BM_2 + BM_3 \dots BM_n$, où chaque BM représente une rubrique différente du budget des ménages : nourriture, logement, transport, etc. Ce budget des ménages est une part du salaire, dont l'évolution est fonction - dans le module « Macroéconomie » - de la productivité (qui dépend de l'évolution du niveau de formation de la population et des évolutions démographiques).

La rubrique transport peut être définie comme l'addition du budget consacré au transport à courte distance et à longue distance. Dans ce cas, nous agrégeons trois échelles géographiques pour simplifier, mais il serait possible éclater le budget en trois, quatre, cinq échelles géographiques ou même davantage. En ce qui concerne TILT, trois échelles sont identifiées :

$$BM_T^{Total} = BM_T^{CD} + BM_T^{reg} + BM_T^{LD}$$

Équation 8

A l'intérieur du budget de chaque échelle géographique, nous retrouvons les éléments liés à la distance, au prix et à la répartition modale (venant du module « Transport & Infrastructures »). Ainsi, nous avons les passagers kilomètres en courte distance et en longue distance multipliés par le prix de chaque mode et la répartition modale à chaque échelle géographique définie par plusieurs facteurs (cf. Chapitre 2).

$$BM_T^{CD} = PKM^{CD} [P^{VPCD} * a_{ij}(t)^{VPCD} + P^{TC} * a_{ij}(t)^{TC}]$$

Équation 9

$$BM_T^{reg} = PKM^{reg} [P^{VPrereg} * a_{ij}(t)^{VPrereg} + P^{TCroutereg} * a_{ij}(t)^{TCroutereg} + P^{trainreg} * a_{ij}(t)^{trainreg}]$$

Équation 10

$$BM_T^{LD} = PKM^{LD} [P^{VPLD} * a_{ij}(t)^{VPLD} + P^{TGV} * a_{ij}(t)^{TGV} + P^{air} * a_{ij}(t)^{air} + P^{trainreg} * a_{ij}(t)^{trainreg}]$$

Équation 11

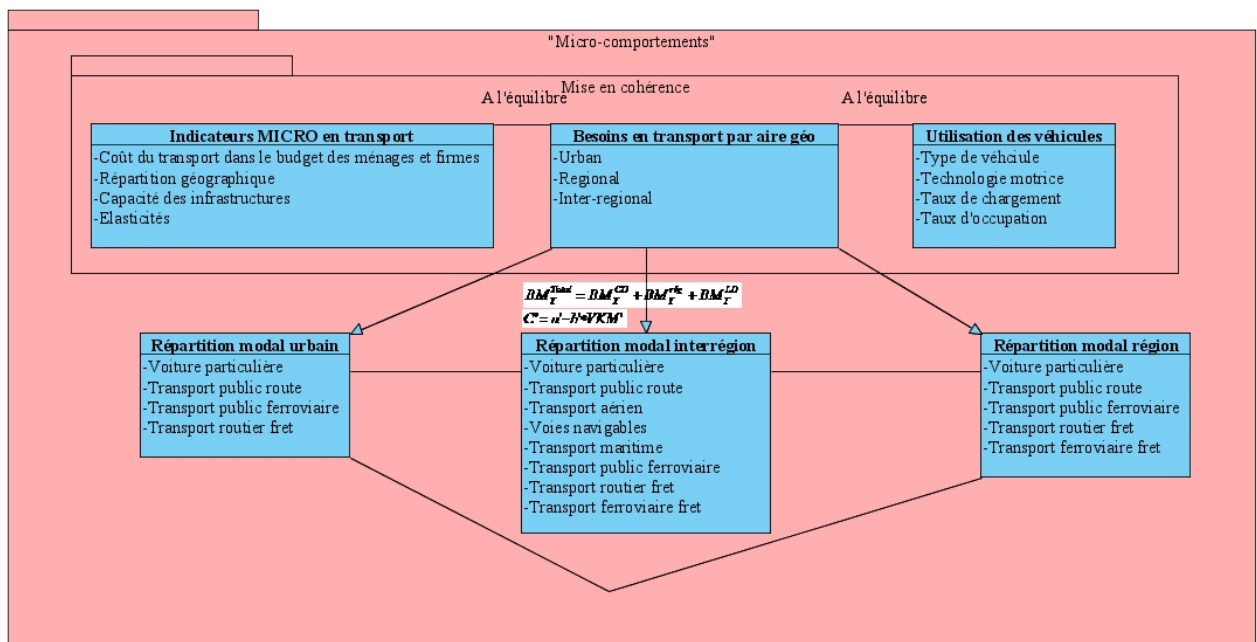
où :

- PKM est égal aux passagers kilomètres ;

- P est égal au prix du mode de transport dans la zone de service en question ;

- $a_{ij}(t)$ est la part modale du mode de transport dans la zone de service calculée sur la base du temps de transport, l'accessibilité et la congestion des infrastructures.

Comme nous pouvons le voir, cette conception du système de transports permet d'allier dans une même équation deux aspects très importants : le temps de transport et le coût monétaire du transport. Dans cette construction, c'est le budget des ménages qui fait office de contrainte mais il dépend à la fois de la part modale liée aux caractéristiques du système des transports et des spécificités modales.



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 7 Diagramme du module microcomportements

Cette conception du budget de transport nous amène à souligner que, si nous supposons un BMT fixe, il peut y avoir des reports entre les modes et sur les échelles géographiques. En d'autres termes, si nous réalisons des gains sur le transport à courte distance (CD), il est possible de retrouver des réinvestissements dans le transport à longue distance (LD). En revanche, si nous supposons que le BMT n'est pas fixe, des réinvestissements seront susceptibles d'intervenir sur l'ensemble du budget du ménage, dont une partie sur le transport. Ainsi, nous pouvons supposer qu'il y a une force de rappel liée au temps de transport maximal. Selon l'enquête HETUS (Harmonised European Time Use Survey), chaque jour, les Français consacrent 23h et 2 minutes à leurs différentes activités et les 58 minutes restantes à

se déplacer. Si le temps de transport moyen quotidien augmentait, cela empièterait sur d'autres activités et cela induirait (à coût constant) un coût supplémentaire (qui aboutirait à une diminution des PKM). Dans ce cadre, nous avons deux options :

- réduire le temps alloué à d'autres activités, c'est-à-dire que ce sont les améliorations en productivité qui permettront « d'avoir plus de temps » ;
- renoncer au déplacement, ce qui équivaut à un arbitrage sur les technologies/localisations et donc à un réinvestissement dans le foncier.

Par conséquent :

- si la hausse du BMT annuel d'un ménage est supérieure à la hausse de la productivité, apparaîtront, soit des renoncements, soit des arbitrages ;
- si la hausse du BMT annuel d'un ménage est inférieure à la hausse de la productivité, apparaîtront des réinvestissements dans le transport LD.

Dans les deux cas, la logique utilisée par TILT pour décrire le système de transport des passagers peut être résumée par les graphes qui suivent, dans lesquelles nous pouvons observer une situation où le prix de la voiture est en hausse. Cette augmentation pousse à une utilisation plus importante des transports en commun par les personnes qui ont l'accès le plus facile à ces infrastructures. Par ailleurs, nous observons deux effets :

- une hausse de l'utilisation des transports en commun avec une baisse de l'utilisation de la voiture ;
- un déplacement de la courbe du budget des ménages car les prix du transport en VP, ainsi qu'en TC augmente (même si la hausse du prix des TC est relativement plus légère que sur la VP).

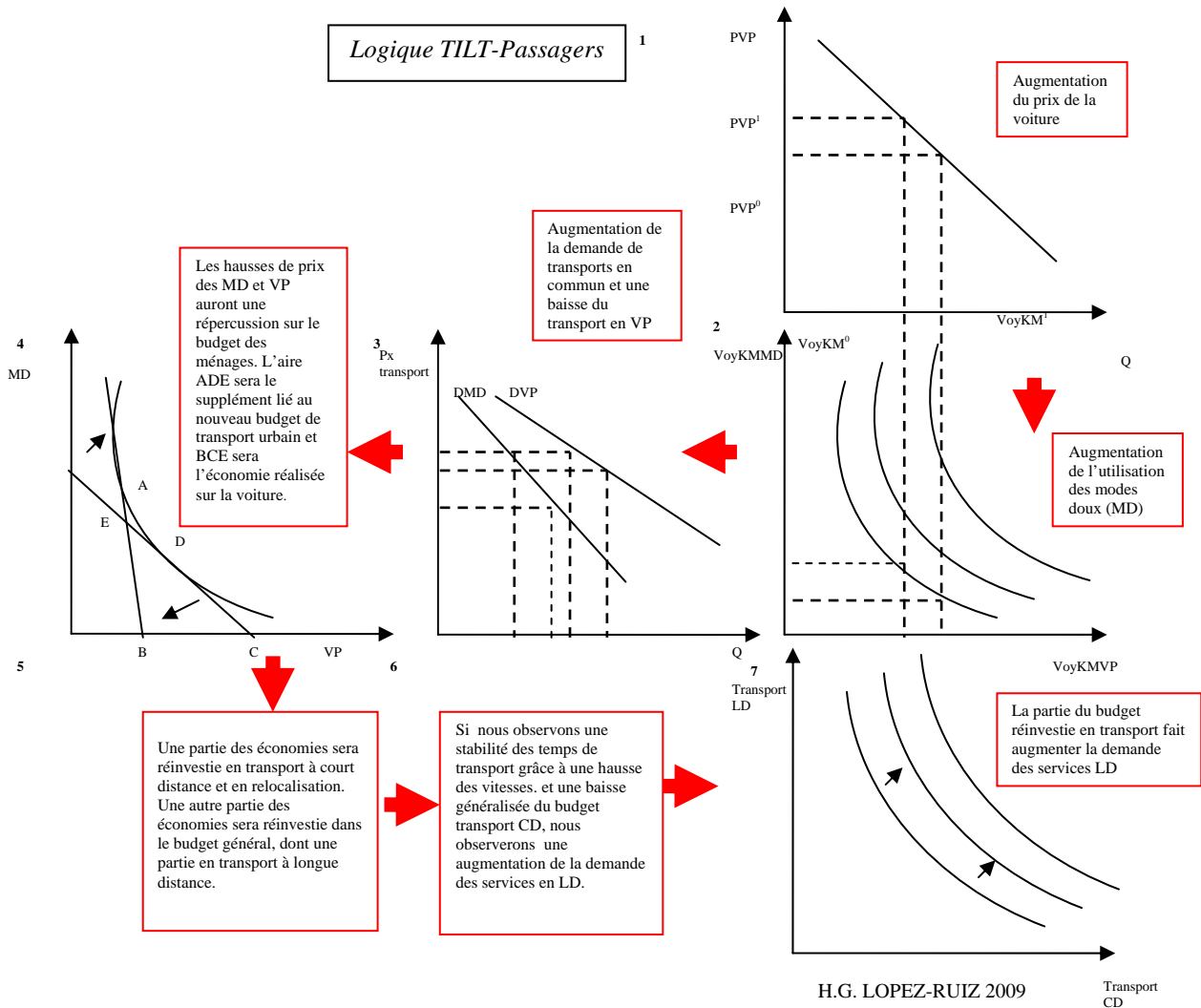


Figure 8 Logique du transport des passagers

Comme le prix de départ des TC est moins élevé que celui de la VP et que la hausse du prix des TC n'est pas suffisamment importante pour rattraper le niveau de coût de la VP, à la fin de la période, les ménages se reportant sur les TC auront réalisé des économies. En revanche, les ménages n'ayant pas accès aux infrastructures de TC et qui ne pourront plus supporter les hausses du prix de la VP préféreront investir dans une relocalisation afin de pouvoir jouir des prix avantageux des TC. En fin de compte, le budget de transport dépensé sera inférieur à ce qu'il était auparavant car les ménages auront réalisé des économies grâce aux arbitrages transport/localisation. Celles-ci seront réinvesties et une partie de ce réinvestissement sera consacré vraisemblablement à l'achat de services de transport de LD.

Ces observations nous conduisent à penser le système des transports comme un système de vases communicants à travers le temps, dans lequel une première répartition est faite selon les besoins et les moyens disponibles pour subvenir à ces besoins et selon l'utilité que le consommateur en retire. Ensuite, à l'intérieur de chacun de ces vases une deuxième répartition est faite selon les besoins et moyens propres à chaque vase. Ce sont des manquements et/ou les impossibilités qui expliquent les passages d'un vase à l'autre.

De cette manière, les PKM en longue distance sont directement liés à deux facteurs : d'une part à l'argent qui reste disponible après avoir satisfait ses besoins obligatoires dans la première période (car, les besoins en courte distance sont satisfaits les premiers) et, d'autre part, au niveau de service que les différents modes proposent (en matière de vitesse et risque de retard) à un prix donné. Ainsi, la demande pour un mode en LD particulier sera définie en fonction de la consommation en CD.

1.3.2 Les arbitrages dans le transport des marchandises

Même si les observations sur les marchandises sont moins évidentes que celles concernant les passagers, il est toujours possible de soutenir l'observation faite dans la première partie de la thèse, où nous avons vu que le transport des marchandises a trouvé, dans l'amélioration relative des vitesses -qui a poussé à une stabilité des vitesses avec des trafics croissants-, un moyen pour agrandir les aires de marché et donc de transport.

Comme le montrent BEN-AKIVA, MEERSMAN et VAN de VOORDE (2008), la structure de production en Europe est marquée par une forte concentration des moyens de production avec un accroissement des distances parcourues par les marchandises à plus haute valeur ajoutée. Au total, l'organisation spatiale de la production n'a pas eu une incidence sur les distances globales de parcours, mais elle en a eu une, en revanche, sur sa segmentation selon les différents stades d'élaboration des produits.

Ces constats nous laissent supposer ceci :

- il y a bien un besoin croissant en matière de vitesse, au niveau français et européen, corrélatif à l'accroissement de la valeur ajoutée moyenne par tonne de produit transporté. Et il 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.

En raison de la situation géographique de la France, ces deux premiers constats ne sont pas sans conséquences. Ils amènent à dire que le besoin croissant de la France en matière de vitesse est lié au fait que, plus les PIB de l'Europe et de la France augmentent, plus leurs économies se spécialisent sur la production des marchandises à haute valeur ajoutée et plus

les inputs nécessaires à la production, ainsi que les produits finis, acquièrent de la valeur. De ce fait, les marchandises devront être transportées de plus en plus rapidement à leur destination finale. Cela nous amène à la constatation que, plus le transport d'une tonne de marchandise finie à haute valeur ajoutée destinée à la consommation est rapide, plus on peut étendre la zone de marché.

En d'autres termes, si l'observation de vitesses croissantes est fortement liée au renchérissement des produits transportés et au développement des infrastructures, elle l'est également au fait que le renchérissement du coût de 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 ajoutée.

Il ressort également de toutes ces observations que le caractère pratique du transport routier, ainsi que la diminution des coûts de transport, ont fortement contribué à ce que la route conserve son importance dans le transport des marchandises et parvienne à accroître de manière spectaculaire la part qu'elle représente sur le marché.

En outre, le développement des chaînes logistiques intégrées - qui a permis le renouveau récent de la navigation intérieure et a assuré au rail de retrouver une certaine stabilité après avoir connue une très forte baisse d'utilisation - marque le pas dans le système et apparaît comme un élément de grande stabilité du coût du transport.

Ainsi, au niveau de la modélisation TILT, nous partons des deux suppositions suivantes :

- le coût logistique d'une économie est la somme des coûts de toutes les firmes;
- nous sommes dans un système où les coûts changent en rapport au coût de transport proportionnellement à la vitesse, à la valeur de la marchandise, au niveau des salaires, au niveau du prix du carburant et à la distance ;

Nous pouvons alors dire que le coût logistique pour une firme est égal à¹¹ :

$$C = \sum b - c * VKM_0$$

Équation 12

où

$$a = [C_0^T + (C_0^T / N)]$$

$$b = [C_0^T / (N * VKM_0)]$$

N est égal à l'élasticité de la demande ;

VKM_0 est égal aux véhicules kilomètres en année 0 ;

C_0^T est égal au coût généralisé du transport et prend la forme suivante :

$$C_0^T = C_0^{TPT} + C_0^{INV} + C_0^{PROC}$$

C_0^{TPT} est égal au coût lié au service de transport

C_0^{INV} est égal au coût lié à coût de stockage et immobilisation

C_0^{PROC} est égal au coût d'approvisionnement

A partir de cette fonction de coût, nous pouvons calculer la fonction de demande de transport :

$$VKM = (a/b) - (C_0^T / b)$$

Équation 13

Dans cette conception de la demande de transport nous pouvons introduire une amélioration ou une détérioration dans le système de transport et nous pouvons calculer les effets sur le coût et la demande de transport à la période suivante, tout en utilisant les mêmes équations mais en ajoutant les effets de cette amélioration ou de cette détérioration sur les kilomètres parcourus.

¹¹Analyse fait sur la base du white paper "Freight Benefit/Cost Study" du NCHRP 342 (2001)

Nous avons donc la nouvelle fonction de coût :

$$C' = a' - b' * VKM'$$

Équation 14

où

$$a' = [C_0^T + (C_0^T / N)] / (1 + DVKM)$$

$$b' = [C_0^T / (N * VM_0)] / (1 + DVKM)^2$$

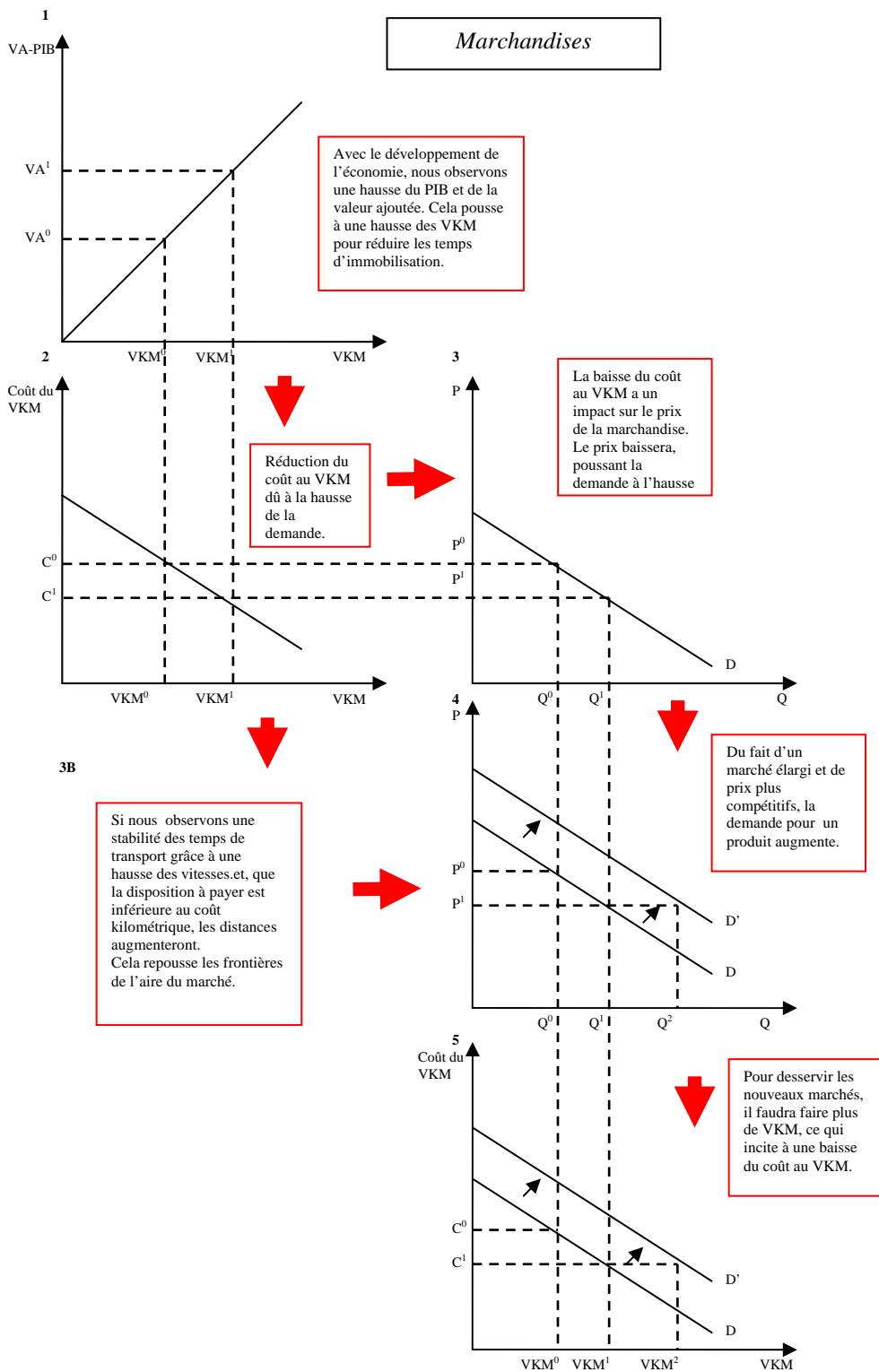
DVKM est le pourcentage de changement dans l'utilisation du système de transport par les firmes pour saturer leurs besoins en transport.

La nouvelle fonction de demande est égale à :

$$VKM' = (a'/b') - (C'/b')$$

Équation 15

A partir de ces spécifications, nous pouvons donc décrire, sur la base des graphes suivants, le fonctionnement du système de transport de fret tel qu'il est conçu dans TILT.



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 9 Logique du transport des marchandises

Dans le premier graphique, nous partons du système actuel de transport de fret. Au fur et à mesure que les années passent, l'économie se spécialise de plus en plus dans la fabrication de produits à haute valeur ajoutée et, en même temps, le PIB connaît une croissance significative. Cette hausse du PIB et de la valeur ajoutée rend le coût d'immobilisation des marchandises de plus en plus élevé. Cette situation demande aux systèmes de transport de s'adapter en minimisant le coût du transport et en augmentant les vitesses, dans un espace géographique donné, afin de réduire le temps de transport pour le stabiliser.

Dès l'instant où le système logistique connaît une réorganisation, ou bien à partir du moment où le système bénéficie de nouvelles infrastructures qui assurent une amélioration des vitesses, les tonnes produites dans un espace donné pourront être acheminées plus loin dans le même temps de transport pour un coût marginal réduit (en raison de la réduction du temps de transport, seuls les coûts liés à l'usure des véhicules et au carburant augmenteront avec la distance).

Ce raisonnement implique que le coût marginal du transport soit inférieur à la disposition à payer des entreprises pour acheminer leurs marchandises à une plus longue distance, étant donné que la disposition à payer est fonction des ventes totales d'une entreprise ainsi que du coût logistique et du temps de transport. La logique qui sous-tend ce raisonnement est basée sur le fait que les entreprises accordent une grande importance aux économies réalisées sur le temps de transport. Dans leur article sur le sujet, ZAMPARINI & REGGIANI (2007) établissent qu'il est possible de calculer la valeur des économies de temps dans le fret (VFTTS-Value of Freight Travel Time Savings). Pour eux, si deux options de transport se présentent à une entreprise qui a une utilité égale à :

$$U_{ij} = \alpha C_{ij} + \beta T_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

où U_{ij} est l'utilité de choisir l'alternative de transport i pour l'entreprise j par rapport à son coût (C_{ij}) et le temps de transport (T_{ij}) où α et β sont les paramètres du coût et du temps de transport et ε_{ij} est le paramètre d'erreur.

ZAMPARINI & REGGIANI définissent que le prix qu'une entreprise est prête à payer pour réduire le temps nécessaire afin de transporter des marchandises du point A au point B est

égale à l'utilité marginale du coût et du temps, soit : $VFTTS = \alpha/\beta$. Ainsi, tant que la VFTTS est égale ou inférieure à la disposition à payer pour un kilomètre supplémentaire, les marchandises parcourront des distances de plus en plus importantes.

Ainsi, dès l'instant où nous considérons que l'augmentation de la distance de transport, à un temps égal, fait intervenir seulement le coût de l'essence et de l'usure -dans les conditions normales de la structure de transports-, la disposition à payer d'une entreprise sera toujours plus élevée que le coût supplémentaire pour transporter une tonne à une plus longue distance.

Nous retrouvons le même type de logique concernant le lien existant entre la demande du transport de fret et l'activité économique dans le projet européen REDEFINE¹² (Relationship between Demand for Freight-transport and Industrial Effects -1999) où les auteurs observent que le transport de fret possède plusieurs déterminants en plus de l'activité économique. Ils testent l'influence de la croissance économique sur le transport des marchandises tout en proposant des estimations de changements dans les déterminants. Cette étude souligne l'influence du développement économique et l'influence des changements logistiques sur le transport de marchandises.

L'analyse de REDEFINE aboutit à des observations très semblables aux nôtres (*cf.* section 2.1.2) où : le facteur le plus important concernant l'évolution du transport de marchandises en Europe est l'allongement de la distance des trajets.

¹² <http://cordis.europa.eu/transport/src/redefinerep.htm>

Chapitre 4. Les impacts : le module « Effets & Quantification des Politiques Publiques » dans TILT

1.4.1 La construction des « sentiers de politiques publiques »

Après avoir expliqué les détails de la modélisation que nous avons utilisée pour la quantification des mesures de transport dans les scénarios envisagés, nous aborderons dans ce chapitre la modélisation des effets des politiques publiques. En effet, un grand nombre de politiques publiques peuvent être envisagées à long terme, et leurs effets sur la structure du transport et sur l'économie doivent être analysés. Pour ce faire, nous définirons en premier lieu les politiques qui pourront être envisagés dans nos scénarios. Dans ce sens, nous construirons des « sentiers de politiques publiques » (dans le même esprit que les « *policy paths* » du projet VIBAT « *Visioning and Backcasting for UK Transport Policy* ») qui seront catégorisées par rapport à l'orientation de leur action (dans le même esprit que dans le projet POSSUM (« *Policy Scenarios for Sustainable Mobility in Europe* »)¹³). Ensuite, nous présenterons les détails du module de quantification des politiques publiques.

Pour nous, les politiques publiques ont deux canaux d'action : les prix et/ou les quantités. Compte tenu de la loi d'offre et de demande, ces deux canaux mènent à une même issue : agir sur le coût généralisé du transport. En conséquence, la mise en œuvre d'une (ou de plusieurs) politique(s) publique(s) visant un facteur 4 amènera des changements importants dans le système de transport. Ils impliqueront que des arbitrages soient opérés au niveau des comportements à travers lesquels les entreprises et les personnes chercheront à intégrer la nouvelle situation tout en maximisant leur utilité et en minimisant leurs coûts généralisés de transport.

¹³Papier basé sur le Rapport final soumis à l'EC DGVIII en 1998

Envisager d'agir sur le coût généralisé du transport nous amène à concevoir le développement du système de transport comme semblable à celui d'un territoire dans lequel des améliorations (ou des dégradations) de la fluidité du réseau sont introduites par la construction (ou par la disparition) d'une infrastructure de transport. L'apparition (ou la disparition) d'une infrastructure de transport amène des gains (ou des pertes) de temps. Ces gains ou ces pertes de temps seront intégrés par les acteurs tout en minimisant leurs coûts généralisés et, parallèlement, en maximisant leurs profits.

Ces jeux de minimisation de coûts et de maximisation des profits consécutifs à un changement dans les vitesses du réseau -donc des coûts de transport- peuvent donner lieu ¹⁴ :

- à une intégration des changements par le système en augmentant les vitesses du réseau (par la construction d'une nouvelle infrastructure ou par l'amélioration des couloirs logistiques, etc.). Cela implique une continuité du système de transports ;

ou bien

- à une intégration des changements par le système en augmentant le temps de transport (notamment si les nouvelles infrastructures ne suivent pas le rythme des besoins). Cela implique une diminution de l'élasticité vitesse/PIB ;

ou bien

- à une augmentation de la disposition à payer (transport par avion par exemple), ce qui entraîne une augmentation des prix à la consommation ;

ou bien

- à une diminution des VKM (soit une densification du système). Cela nécessite des adaptations du système spatial au niveau des distances ;

Ce dernier point nous amène à envisager d'agir sur les quantités (ce qui revient à agir sur les distances totales). Ce canal d'action suppose une contrainte sur la capacité à payer plus de vitesse (par exemple, payer des envois *via* transport aérien). Ainsi, si nous supposons une forte hausse du coût de transport et/ou une restriction des quantités (par d'autres moyens que le coût), il sera peut-être nécessaire de modifier la structure spatiale du système de transport

¹⁴ C'est le niveau du prix de transport qui déterminera quelle option se produira

en agissant sur les distances parcourues. Par conséquent, nous pouvons supposer que le système s'adaptera à un coût du transport relativement élevé et que, dans un souci de minimisation des coûts, les agents économiques chercheront à le décentraliser afin de maximiser le profit qu'ils peuvent en tirer.

Par ailleurs, il semblerait que la suite logique à une adaptation du système par le temps de transport puisse être une adaptation par les distances. Le coût du transport étant devenu trop onéreux, les agents économiques seraient amenés à décentraliser toute une série d'activités afin de proposer des services de proximité, et les ménages devraient de se rapprocher des centres d'activité.

Comme nous pouvons le constater, nous avons identifié deux canaux d'action des politiques publiques, mais leurs effets ne sont pas certains et nous ne sommes pas à même de spécifier quelle politique publique agit sur quel canal socio-économique et de quelle manière. De ce fait, quantifier correctement les politiques publiques qui seront à déployer pour arriver au facteur 4 s'avère très important afin de planifier quel canal viser et à travers quelle politique. En effet, plusieurs politiques publiques peuvent viser la réduction des VKM - par exemple - mais elles risquent, en même temps, d'avoir des effets non voulus : un problème de mise en place d'une politique pourrait amener à diminuer la part modale du transport routier tout en faisant augmenter la part du transport aérien (et donc des émissions de CO₂).

Identifier les politiques publiques qui pourraient avoir un effet sur le système exige d'identifier le contexte dans lequel nous nous trouvons. En effet, le contexte de l'évolution du système de transport s'est formé par les évolutions du système et de la société, et il faut tout d'abord le comprendre afin de pouvoir identifier les points d'inflexion et rupture qui pourraient être visés.

Des tendances et des contre-tendances

En matière de transports, les dernières décennies ont fait apparaître, au sein des pays industrialisés, différentes tendances :

-les transports des marchandises ont suivi une tendance globale de dématérialisation du PIB. La baisse de la part relative de l'agriculture, des industries agro-alimentaires, de l'industrie et de l'énergie ont conduit à réduire certains types de trafic, notamment les trafics ferroviaires de charbon ou de produits métallurgiques. Le développement des services renforce la tendance à la dématérialisation et se manifeste par une baisse ou par une réduction des transports de marchandises ;

-après des nombreuses décennies de baisse dans l'utilisation des transports en commun, nous observons, depuis quelques décennies, une augmentation de l'utilisation des services de transport en commun. Les contraintes liées à l'utilisation d'une voiture commencent à avoir un effet sur la densité de certaines grandes villes françaises et permettent aux TC et aux modes doux de tirer leur épingle du jeu.

A ces tendances se joignent des contre-tendances :

La tertiarisation de l'économie est composée d'un petit nombre de services purs ; beaucoup de services sont "mixtes", à savoir qu'ils exigent des biens comme compléments indispensables. C'est le cas des transports, des télécommunications, de la médecine, de l'éducation, etc. Le transport des passagers a connu une tendance vers l'allongement des distances des parcours et un éclatement du transport lié aux loisirs et aux motifs professionnels, qui a été permis par l'augmentation des vitesses dans ces dernières décennies.

La dématérialisation du PIB a entraîné l'instauration d'une réduction de la taille des lots et de l'accroissement du ratio valeur ajoutée/poids. Le fait que les produits aient une valeur par tonne croissante autorise une croissance du coût absolu des transports, sans augmenter pour autant le coût relatif.

La baisse du poids relatif des produits transportés peut donc aller de pair avec une hausse des volumes et une augmentation des distances, surtout si, dans le même temps, les systèmes de transport se modernisent et facilitent la massification des flux.

Cette même augmentation de la valeur ajoutée a donné lieu à un renforcement de l'augmentation du nombre de déplacements professionnels et, du fait de l'augmentation des salaires, les personnes n'ont pas seulement accru leur consommation en loisirs, mais elles ont aussi diversifié et multiplié le nombre de déplacements liés aux loisirs.

Tendances et contre-tendances se combinent dans un résultat global qui est, au total, plutôt favorable aux contre-tendances, ce que traduit l'observation des données nationales et internationales de transport des marchandises et passagers : les tonnages et passagers transportés n'augmentent pas beaucoup, mais les TKM et PKM progressent à peu près comme le PIB lorsque l'on intègre le transport international. Cela peut être détaillé en distinguant les différents modes (route, fer, air, mer) et les vitesses relatives. Il est ici important de souligner non seulement le rôle de la vitesse relative (route par rapport au fer, air par rapport aux autres), mais aussi celui de la massification et de la standardisation (cf. le transport maritime), qui ne changent pas significativement les vitesses relatives, mais qui assurent la fiabilité et la baisse des coûts relatifs.

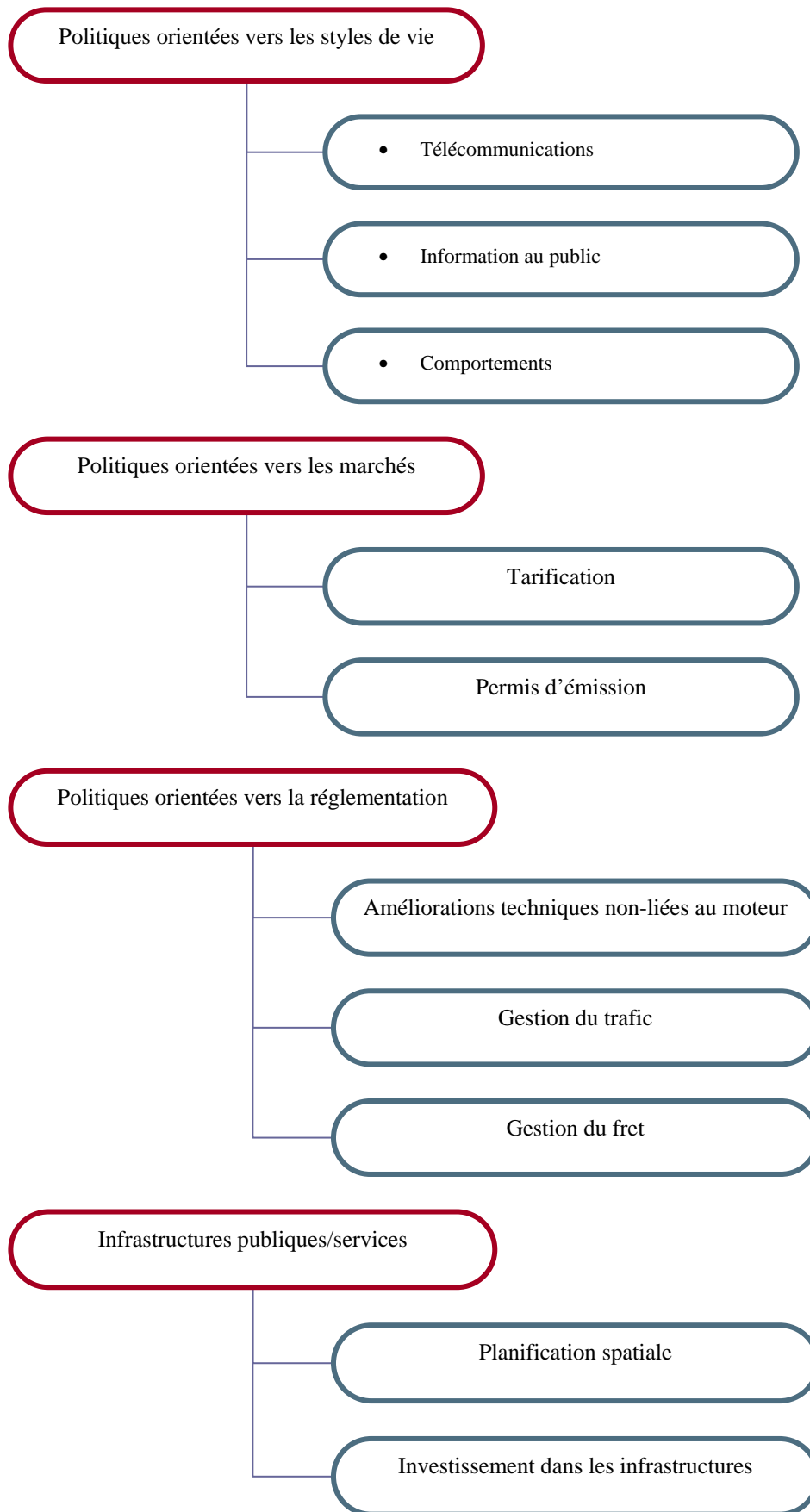
Après avoir identifié les principales tendances et contre-tendances du système de transports, nous sommes en mesure de pouvoir définir quatre types de politiques qui peuvent être mises en place pour modifier le système des transports. Afin d'être plus précis quant aux politiques qui pourraient potentiellement conduire à des réductions des émissions de CO₂, nous

proposons de suivre R. HICKMAN et D. BANISTER, qui dénoncent, dans le projet VIBAT (2006), l'inexistence d'une liste exhaustive de mesures qui fasse l'objet d'un consensus, un point important à aborder par la communauté scientifique travaillant sur le sujet des scénarios de développement durable. Suite à ce constat, le projet VIBAT dresse une liste des possibles politiques publiques. Nous reprendrons cette liste et nous ajouterons quelques modifications afin de prendre en compte les différences existant d'un pays à un autre¹⁵.

Dix grandes catégories sont identifiées dans le projet VIBAT sur la base des travaux de BANISTER et l'encyclopédie TDM (*Transportation Demand Management*) du *Victoria Transport Institute* (2007). Ces dix catégories représentent un condensé de politiques économiques mais elles sont surtout axées sur les passagers. Ainsi, pour notre travail, nous proposons d'intégrer des politiques visant plus particulièrement le transport de marchandises et qui sont issues des travaux sur le découplage entrepris par McKINNON (2006 & 2007). Nous avons également modifié la notion de planification urbaine au profit de la planification spatiale afin de disposer d'une marge d'opération plus importante. Ainsi, nous pouvons également prendre en compte la planification de l'occupation de sols en dehors des aires urbaines et étendre cette notion à la planification de l'implantation des commerces, des usines et des dépôts.

Voici la structure graphique des politiques publiques que nous avons déduite des travaux réalisés par les auteurs précédemment cités et que nous proposons pour cette thèse :

¹⁵ Le projet VIBAT cherche à construire des scénarios pour l'Angleterre.



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 10 Structure des politiques publiques

Ainsi, nous allons procéder à l'analyse de chacun des éléments précédemment présentés tout en les catégorisant selon leur orientation et en reprenant la classification du projet POSSUM :

- Politiques orientées vers les styles de vie :

- Télécommunications

Le développement des télécommunications et des technologies, qu'elles soient au service des transports ou au service de la logistique des déplacements personnels, sont des politiques qui pourraient être mises en place dans un terme relativement court et qui pourraient proposer des économies d'énergie importantes.

- Information au public

L'information au public est très liée aux comportements et aux télécommunications. Ce type de mesures est très fortement associé à la réglementation et à la volonté des autorités publiques de développer une optimisation à travers l'amélioration de l'information.

- Comportements

Les comportements, même s'ils ne sont pas réglementés, sont importants à deux niveaux : les comportements vis-à-vis de la réalisation des besoins quotidiens et leur impact sur l'utilisation des services de transport d'une part et la manière d'utiliser les transports (conduite, planification d'itinéraires, etc.) d'autre part. Les politiques publiques visant les comportements ont des effets notables sur l'utilisation des infrastructures et supposent des besoins importants en matière d'information et de technologie.

- Politiques orientées vers les marchés :

- Tarification

Les politiques de tarification vont dans le sens d'un coût de transport plus élevé, surtout si le transport nuit au développement durable. Ce genre de politiques est à coupler avec des investissements en infrastructures et des politiques économiques plus étendues afin de pouvoir à la fois planifier leur application et répondre aux effets des reports modaux que ces politiques pourraient amener.

- Permis d'émission

Ici, nous identifions des politiques économiques qui seraient des incitations sur l'ensemble du système de transport sans forcément viser un acte en particulier mais plutôt les conséquences de cet acte. Dans cette rubrique, nous concevons l'inclusion de politiques publiques de grande envergure comme celle que pourrait représenter un système de transport dans une logique de permis d'émission au niveau national, voire au niveau international. Ces mesures cherchent à inciter des changements dans les comportements en ciblant la totalité du système.

- Politiques orientées vers la régulation :

- Améliorations techniques non-liées au moteur

Les améliorations techniques non-liées au moteur peuvent réduire les émissions de CO₂, mais l'incertitude qui plane sur la faisabilité et la viabilité de ces améliorations techniques est trop importante pour considérer, avec les améliorations techniques liées au moteur, qu'il s'agit de la solution optimale.

- Gestion du trafic

La gestion du trafic peut générer des influences positives sur la mobilité et le comportement des personnes. Deux problématiques ressortent dans la gestion de trafic : l'efficacité des routes et l'amélioration des itinéraires.

Une meilleure accessibilité des villes pourrait se traduire par une réduction des kilométrages mais devrait être contrôlée afin d'éviter une augmentation des trafics faisant suite à un effet rebond.

L'amélioration des itinéraires : elle pourrait être liée à l'utilisation des nouvelles technologies, qui pourraient réduire de 5 à 10% les kilométrages (selon les calculs du Department for Transport britannique), et la magnitude des réductions serait déterminée par la nature de l'opération de transport et le niveau des améliorations que pourrait représenter l'utilisation des innovations en comparaison du système actuel (*Department for Transport, 2005 in McKINNON 2007*).

- Gestion du fret

Un découplage pourrait résulter également de la restructuration à l'intérieur du système productif et manufacturier. Les secteurs industriels peuvent faire varier leur quantité de

mouvements générés par unité d'output en améliorant la logistique de leur production et du transport. Indépendamment du fait que, au Danemark et en Grande Bretagne, ces changements ont eu peu d'influence (FOSGERAU & KVEIBORG (2004), McKINNON 2007), nous ne pouvons pas nous affranchir de l'analyse de ce genre de mesures.

- Infrastructures publiques/services :
 - Planification spatiale

La planification urbaine est complémentaire des politiques présentées précédemment. L'éventualité de la mise en place d'une planification spatiale nous amène à évoquer la notion d'une optimisation dans l'utilisation de l'espace (à condition qu'elle soit convenablement planifiée) qui puisse proposer des économies en matière de transport.

Cependant, la planification spatiale doit aussi veiller à ce qu'un équilibre puisse être maintenu entre les économies de transport et les autres activités économiques car, en améliorant les vitesses moyennes et la fiabilité du transport routier, il est possible de créer également des effets-rebond. A l'inverse, plus la congestion ou les temps de transport seront importants, plus la concentration aura tendance à se renforcer et l'activité économique pourrait être pénalisée.

- Investissement dans les infrastructures

L'investissement dans les infrastructures est sans doute l'une des politiques à laquelle il sera impossible d'échapper. Quelle que soit l'influence des innovations techniques et/ou des changements sur le comportement des personnes, il faudra inévitablement réaliser de forts investissements en infrastructures. Ils devraient aller dans le sens de la recherche d'une meilleure accessibilité, accompagnée d'une économie des énergies.

Toutes ces politiques cherchent à avoir un impact durable sur la structure tendancielle du système de transports. Chacune d'entre elles aura un effet différent sur la structure, même si elles cherchent toutes à contrôler les émissions de CO₂, soit en diminuant les distances de transport, soit en augmentant le coût du transport.

Il est particulièrement important de catégoriser correctement les différentes combinaisons des politiques publiques car, au niveau de la modélisation, les effets de chaque sentier de

politiques publiques (*policy paths*) ne seront pas les mêmes. Les politiques orientées vers le style de vie auront un impact sur les activités des personnes et des entreprises, alors que celles qui seront orientées vers les marchés auront un impact sur le coût monétaire des transports. La réglementation aura des effets sur l'efficacité de l'utilisation des transports et des infrastructures (mobiles et fixes). Enfin, les politiques orientées vers les infrastructures publiques et les services joueront davantage un rôle d'accompagnement en ce qui concerne les effets des politiques publiques.

A partir de cette catégorisation, nous construirons des sentiers de politiques publiques pour chaque scénario. A travers une analyse de sensibilité couplée à une analyse multicritères, TILT est en mesure de proposer des sentiers quantifiés cohérents avec la vision de chaque scénario. Cette quantification de l'impact de chaque politique publique sur le système est complétée par une analyse d'impact sur l'économie et les investissements nécessaires. Dans le chapitre suivant, nous aborderons la méthodologie utilisée pour analyser les impacts économiques et financiers de chaque sentier de politiques publiques.

Analyse Sensibilité et MC des PP

Télécom	2%		
Info au public	1%		
Patrons de comportement	1%	4%	Politiques orientées vers les styles de vie
Tarifification	8%		
Permis	4%	13%	Politiques orientées vers les marchés
Améliorations tech. Non moteur	27%		
Gestion du trafic	22%		
Gestion fret	18%	67%	Politiques orientées vers la réglementation
Planification spatiale	10%		
Investissement dans les infras	7%	17%	Infrastructures publiques/services

Figure 11 Prise d'écran de contrôle du module des politiques publiques

1.4.2 Les effets des « sentiers de politiques publiques » sur l'économie française et le chiffrage des investissements

Comme nous avons pu le constater dans la précédente section, toutes les politiques publiques visent à modifier le système de transport par différents éléments pris en compte dans notre système d'équations. Ainsi, pour les politiques publiques qui visent à avoir un impact sur la vitesse, c'est l'accessibilité propre au mode affecté qui sera influencée. Les politiques cherchant à restreindre les quantités auront des influences directes sur le budget monétaire du transport, des influences positives ou négatives, selon le mode de transport qui sera « pénalisé » et son coût relatif ; les politiques cherchant à influencer le coût auront, elles aussi, des incidences sur le budget monétaire. En revanche les politiques publiques d'infrastructures et planification spatiale auront des effets sur le budget de l'Etat.

Cependant, ces influences n'auront pas que des effets négatifs si, et seulement si, une contrainte de liberté n'est pas respectée. Autrement dit, la mobilité est le moyen pour les personnes de faire des affaires, de travailler, d'acheter, de se divertir, etc. Si la mobilité est restreinte sans que l'on propose des substituts, les pertes en utilité pourraient être plus importantes que les gains en matière d'environnement.

Dans cette deuxième section, nous expliquerons les efforts de modélisation réalisés pour examiner les liens existant 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 mode et par secteur pour l'ensemble du système des transports. Ainsi, nous serons en mesure de créer des sentiers de politiques publiques qui seront quantifiés pour dégager des conclusions concernant leur viabilité.

Ce module cherche à atteindre un double objectif : 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.

L'idée inhérente à ce module est celle de l'analyse input-output (I-O) de W. LEONTIEF qui est adossée à une analyse de sensibilité. Nous sommes en présence d'une économie à n branches, définie par :

$$\mathbf{AX} + \mathbf{Y} = \mathbf{X}$$

Équation 16

où A est la matrice des coefficients techniques, X le vecteur des productions et Y celui des emplois finals (PIRIOU, 2005).

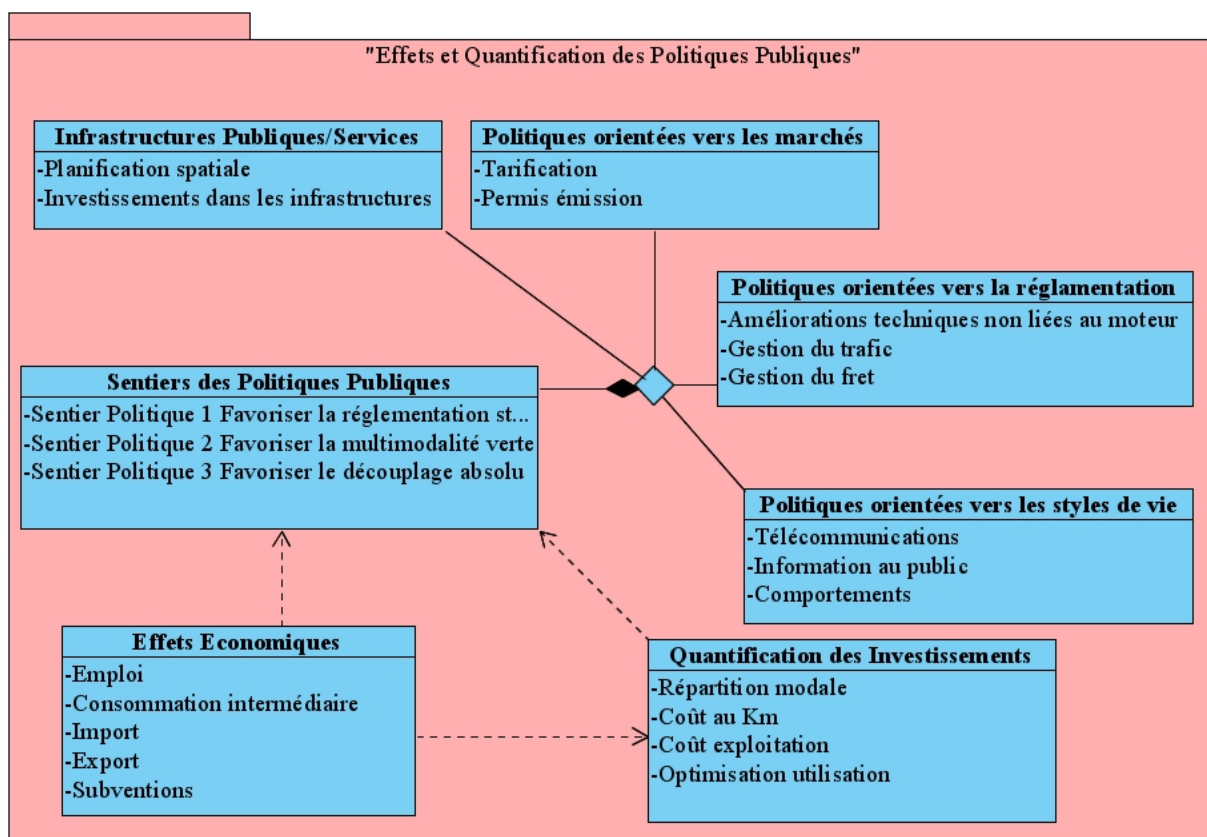
Nous avons choisi d'utiliser une analyse du type I-O pour plusieurs raisons :

- des analyses du type I-O sont généralisées dans les études cherchant à connaître l'intensité en GHG des activités humaines (GTAP¹⁶, OECD¹⁷, Yale University¹⁸) ;
- ce type d'analyses permet de connaître les effets des politiques à la fois sur les émissions de CO₂ et sur l'activité économique du pays ;
- ce type d'analyse nous permet d'évaluer l'intensité de CO₂ liée à l'intensité de transport de chaque branche.

¹⁶ www.gtap.agecon.purdue.edu

¹⁷ AHMAD, N (2004) in Measuring Sustainable Development. Integrated Economic Environmental and Social Frameworks

¹⁸ <http://www.climate.yale.edu/seeforyourself/>



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 12 Diagramme du Module Politiques Publiques

L'analyse input-output classique implique que la technologie est stable et donc que les coefficients techniques restent les mêmes. Pour les besoins de cette recherche nous avons supposé que l'instauration d'un objectif important, comme le facteur 4, n'est pas une mesure qui entraîne en soi des changements technologiques. En revanche, les politiques qui accompagnent cet objectif peuvent entraîner des investissements allant dans ce sens. De cette manière, une fois établie une liste de politiques, nous serons en mesure d'établir des sentiers de politiques qui permettront de construire des scénarios contrastés.

Afin de pouvoir comptabiliser les effets des politiques publiques mises en avant dans cette thèse nous avons besoin d'un moyen de quantification des effets des politiques. La méthodologie choisie pour cette analyse (input-output) permet de relier un TES (Tableau d'Entrées et Sorties) - qui nous donne une description de l'interdépendance entre les branches - aux effets des politiques publiques. Grâce à l'utilisation des coefficients technico-économiques nous serons en mesure de présenter les effets des politiques en matière de

transport concernant l'ensemble de l'économie. Il va de soi que cette quantification des effets n'est pas d'une précision extrême et que les effets d'un changement dans le système de transports sont difficilement quantifiables de manière rigoureusement exacte.

Les scénarios que nous allons présenter dans la deuxième partie de cette thèse ont vocation à modifier la production dans la branche transport dans le sens où il y aura des reports modaux mais sans que la production totale de la branche soit mise en cause.

COMPTE D'EXPLOITATION PAR BRANCHE 2050		GA01	GA02	GA03	GB01	GB02
B1	VALEUR AJOUTEE	68 221	6 371	2 898	11 556	6 189
D1	Rémunération des salariés	12 174	1 424	864	7 154	3 700
B2 ou B3	EBE ou revenu mixte (1)	56 053	5 084	2 045	3 744	2 089
D29	Autres impôts sur la prod.	1 390	27	12	351	255
D39	Subventions d'exploitation	-1 393	-92	-17	-40	-66
(1) EBE : excédent brut d'exploitation	PIB	68 218	6 306	2 893	11 867	6 378

Figure 13 Prise d'écran du module de quantification des impacts économiques

Ainsi, nous avons construit un module d'analyse de politiques publiques paramétrable et directement relié au module « micro-comportements ». Les sentiers de politiques publiques prennent forme dans TILT et montrent leurs effets par rapport à la structure du transport définie formellement à travers la modélisation. De cette manière, nous sommes donc à même de quantifier l'effet d'un sentier de politiques publiques grâce à l'effet qu'il aura sur :

- la structure du transport (coûts, vitesses, temps de transport, infrastructures) ;
- l'économie nationale ;
- les émissions.

Une analyse de sensibilité est réalisée dans ce module, afin d'identifier quel est l'effet de chaque sentier de politiques publiques. Cette analyse est couplée à une analyse multicritères qui permet à l'utilisateur de définir le poids de chaque politique publique à l'intérieur de chaque sentier. Ainsi, ce module nous permet d'observer les effets directs des politiques publiques sur la consommation énergétique dans le secteur des transports, à travers :

- les canaux par lesquels chaque politique a un impact ;
- la puissance de l'impact de chaque politique ;

- l'effet de chaque politique sur l'ensemble du système et sur l'économie.

De cette manière, les effets sur l'économie analysés par notre module sont :

- l'effet sur le PIB ;
- l'effet sur la production d'autres secteurs ;
- l'effet sur l'emploi ;
- l'effet sur les importations et sur les exportations ;
- l'effet sur les apports des Administrations Publiques (APU).

Les effets sur la structure du transport sont pris en compte en analysant les effets des changements comportementaux sur :

- les infrastructures de transport fixes ;
- les infrastructures de transports mobiles.

Hypothèses générales se référant à ce module

Nous considérons qu'une modification de la répartition modale ne suppose pas une perte du nombre d'emplois dans le secteur, mais plutôt un réaménagement des forces de travail à l'intérieur de la branche transport. En revanche, une modification provoquant une diminution de la production entraîne une perte du nombre d'emplois dans la branche.

Nous considérons également que la structure de coefficients techniques reste stable sur l'ensemble de la période d'étude.

Nous considérons enfin que les hausses du coût du transport lié aux différentes politiques publiques sont en partie reversées aux caisses de l'Etat, qui réinvestit en construction d'infrastructures et en développement des transports en commun.

La partie de la hausse du coût du transport considérée comme revenant à l'Etat est cohérente avec une taxe carbone de 320€par tonne de CO₂.

La partie revenant à l'Etat est ensuite réinjectée dans le TES comme étant un apport des APU dans les branches se référant à la construction et les transports publics. La somme imputée à la construction est calculée en cohérence avec les besoins supplémentaires en infrastructures et avec les besoins supplémentaires en matière de TC. Ces besoins sont propres au sentier de politiques publiques propre à chaque scénario.

Chapitre 5. Les technologies, consommation d'énergie et leur quantification : Le module « Emissions » dans TILT

Le modèle 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 formé par trois modules :

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

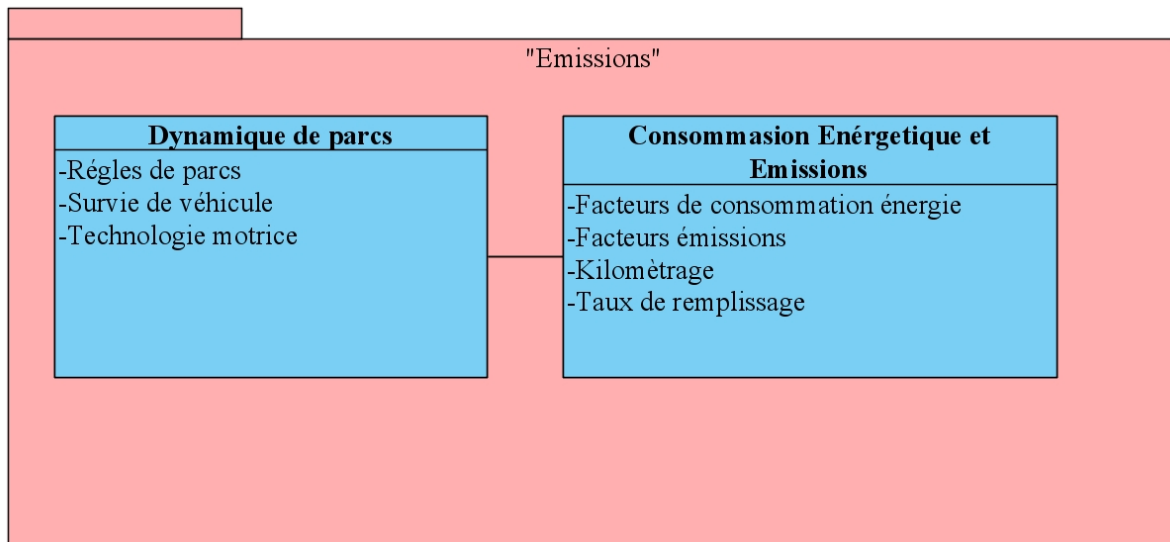


Figure 14 Diagramme du module Emissions

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

1.5.1 Emissions du transport à courte distance

Le module de simulation des parcs est inspiré des travaux de C. GALLEZ (1994). Il permet de prévoir la structure du parc automoteur tout en laissant aux innovations automotrices l'opportunité d'évoluer de manière flexible en ce qui concerne leur année d'entrée dans le marché et leur 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 innovations techniques selon une règle générale de diffusion des innovations en fonction de l'année de démarrage de celle-ci.

La règle générale de diffusion des innovations techniques est celle d'une logistique qui s'applique d'abord aux innovations génériques : MCI, hybrides, PAC, électriques. Ensuite, elle s'applique à chaque innovation à l'intérieur des techniques génériques (PAC avec reformeur méthanol, puis PAC avec hydrogène de réseau par exemple).

Sont précisés l'année de démarrage (première entrée sur le marché des véhicules neufs), l'âge moyen des véhicules, le maximum de pénétration susceptible d'être atteint - en fonction de l'innovation et de son champ d'application - et les paramètres de la logistique.

Parts de marché dans immat neuves																		
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
MCI-BAU																		
total immat neuves	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	96%	91%	83%	73%	60%	
diesel ds total	0,47	0,47	0,39	0,42	0,4	0,44	0,49	0,56	0,63	0,67	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
essence ds total	0,53	0,53	0,61	0,58	0,6	0,56	0,51	0,44	0,37	0,33	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
MCI	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	4%	8%	13%	19%	27%	
diesel performant	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	5%	8%	11%	16%	
essence performant	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	5%	8%	11%	
GPL	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
GNV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
H ²	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
MCI / hybride rechargeable	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	4%	8%	13%	
diesel	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	6%	9%	
essence	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%	4%	
GPL	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
GNV	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
H ²	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
PAC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
GNV + réformeur	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
méthanol + réformeur	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
H ²	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Electrique pur	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

Figure 15 Capture du sous-module de dynamique des parcs

Ainsi, nous identifions les mesures cherchant à changer le transport en apportant des améliorations technologiques ou d'infrastructure pour influencer les distances et les quantités d'émissions de CO₂ émises.

De cette façon, le module de simulation des parcs fournit une répartition des véhicules du parc qui suit une règle de priorité qui privilégie les innovations génériques et donne et, ensuite, donne priorité aux techniques à l'intérieur de chaque catégorie générique.

Le module de simulation des parcs est neutre vis-à-vis de l'utilisation des véhicules, exception faite, en partie, par le maximum de pénétration, qui peut être borné par le champ d'application (par exemple véhicule électrique pur).

La première fonction du module de simulation des parcs est donc de ventiler le parc selon les différents services de mobilité, pour lesquels le kilométrage annuel ainsi que les conditions d'utilisation des véhicules sont spécifiques.

Pour cette logique de pénétration des parcs, nous prenons appui sur les études de DESMET & PARENTE (2006) ainsi que de HUMMELS. Dans leur article intitulé « *Bigger is Better : Market Size, Demand Elasticity and Resistance to Technology Adoption* », ils avancent l'idée selon laquelle un grand marché, que ce soit à cause de la population ou du libre échange, implique une forte hausse des revenus qui est suivie d'une réduction des prix associée à l'introduction d'une technologie plus productive. Comme résultat, l'adoption d'une nouvelle technologie est plus profitable et les gains des fournisseurs de facteurs ont moins de risques d'être affectés de façon négative. Les firmes opérant sur des marchés plus grands ont alors une incitation plus forte à adopter des technologies plus productives, et leurs fournisseurs de facteurs de production, de leur côté, sont moins incités à résister l'adoption de ces nouvelles technologies.

HUMMELS, qui a également utilisé le modèle de LANCASTER pour ses travaux, estime, dans son article, que les changements dans les prix des produits co-varient négativement avec la croissance du PIB et positivement avec la croissance du PIB par tête. Il montre et confirme que la décroissance de l'utilité marginale des nouvelles variétés de produits a comme conséquence une élasticité de la demande plus importante (et donc de prix plus bas) dans les pays plus grands, et c'est inverse dans les économies les plus riches (ce qui va dans le même sens que les conclusions de DESMETS & PARENTE.)

Cette ventilation est réalisée sur la base de deux critères :

- pour les VP uniquement : statut du véhicule (mono ou multi-équipement) au regard de la pluralité des besoins de mobilité : segmentation entre véhicules utilisés très majoritairement dans l'espace urbain (2^{ème} VP) *versus* véhicules multi-fonctions (1^{ère} VP) ;
- pour tous les véhicules : face à la portée géographique des différents services de mobilité (l'urbain [de 0 à 50 km], l'interurbain [de 51-500 km] et la longue distance [plus de 501 km]), sont établies des règles de priorité pour l'allocation des innovations

basées sur les capacités de stockage embarqué et sur les conditions de réapprovisionnement.

Ainsi, les véhicules électriques sont alloués automatiquement comme des véhicules répondant exclusivement aux besoins de services de mobilité urbaine. Les véhicules à hydrogène, ainsi que ceux au GNV et les hybrides, sont d'abord alloués exclusivement aux services de mobilité urbaine non couverts par les véhicules électriques, et ensuite, progressivement, aux services de mobilité régionale, puis interrégionale. Les PAC sont allouées en priorité, suivies des hybrides.

Les MCI gazole et essence, qu'ils soient BAU ou performants, sont répartis de façon neutre par rapport aux distances, mais ils sont contraints par les parts de marché déjà allouées aux innovations.

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

Pour les modes terrestres, le module d'allocation des véhicules kilomètres est 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, du comportement des passagers et de l'organisation du système de transport, qui sont déterminés par les autres modules du modèle.

Distribution des vkm

	Avec prise en compte de l'âge		
	2000	2025	2050
LONGUE DISTANCE	120	188	242
MCI	120	172	242
diesel BAU	76	21	0
essence BAU	44	10	0
diesel performant	0	127	202
essence performant	0	14	40
GPL	0	0	0
GNV	0	0	0
H ²	0	0	0
MCI / hybride rechargeable	0	0	0
diesel	0	0	0
essence	0	0	0
GPL	0	0	0
GNV	0	0	0
H ²	0	0	0
PAC	0	0	0
GNV + réformeur	0	0	0
méthanol + réformeur	0	0	0
H ²	0	0	0
Electrique pur	0	0	0

Figure 16 Capture du module d'allocation des Vkm

Le module de calcul des consommations fonctionne à partir des données fournies par le module de répartition du parc de véhicules et des véhicule-kilomètres. La répartition des Vkm sera croisée avec les données techniques relatives à chaque mode, à chaque technologie et à chaque zone de service, afin de déterminer, dans le module, la consommation d'énergie des véhicules puis les émissions liées aux trafics.

Les émissions sont calculées par technologie motrice et par période. Pour les technologies MCI conventionnelles (BAU), ce module prend également en compte la période d'entrée du véhicule sur le marché afin d'intégrer l'évolution des performances énergétiques et environnementales liée aux prescriptions européennes et à l'évolution technique historique. Les facteurs d'émissions utilisés (en annexes) sont les mêmes que ceux employés pour la recherche LET-ENERDATA (2008).

LONGUE DISTANCE						
Trafic	BUS ET CARS			VP et VULVP		
	2000	2025	2050	2000	2025	2050
Total	0,84	0,95	0,00	119,64	256,64	405,06
MCI	0,84	0,47	0,00	119,64	0,00	0,00
diesel BAU	0,84	0,22	0,00	75,61	0,00	0,00
essence BAU	0,00	0,00	0,00	44,03	0,00	0,00
diesel performant	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
essence performant	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
GPL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GNV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MCI / hybride rechargeable	0,00	0,48	0,00	0,00	162,71	405,06
diesel	0,00	0,34	0,00	0,00	113,89	283,55
essence	0,00	0,14	0,00	0,00	48,81	121,52
GPL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GNV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PAC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
GNV + réformeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
méthanol + réformeur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ²	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Electrique pur	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figure 17 Capture du récapitulatif du module émissions 1

LONGUE DISTANCE						
Energie & Emissions	BUS ET CARS			VP et VULVP		
	2000	2025	2050	2000	2025	2050
Passagers- km [Gpkm/an]	15	17	0	281	404	580
Vehicule-km [Gvkm/an]	0,8	0,9	0,0	120	257	405
Energie				Energie		
essence [mill m3 /a]	0,0	1,0	0,0	essence [mill m3 /a]	3	3
Gazole [mill m3 /a]	0,3	0,2	0	Gazole [mill m3 /a]	4	7
GPL [mill t /a]	0,00	0,00	0,00	GPL [mill t /a]	0,00	0,00
GNV [TWh PCI /a]	0,00	0,00	0,00	GNV [TWh PCI /a]	0,00	0,00
Méthanol [mill m3 /a]	0,00	0,00	0,00	Méthanol [mill m3 /a]	0,00	0,00
H ² [TWh PCI /a]	0,00	0,00	0,00	H ² [TWh PCI /a]	0,00	0,00
Elec (TWh/a)	0,00	0,00	0,00	Elec (TWh/a)	0,00	0,00
Emissions				Emissions		
CO2-em [1000t/a]	735,56	439,08	0,00	CO2-em [1000t/a]	18490,13	25267,57
NOx-emissions [t/a]	9739,17	1576,74	0,00	NOx-emissions [t/a]	30080,42	25171,05
VOC-emissions [t/a]	4238,21	203,41	0,00	VOC-emissions [t/a]	27033,26	5184,85
PM-emissions [t/a]	692	20	0	PM-emissions [t/a]	6073,98	2754,17

Figure 18 Capture du récapitulatif du module émissions 2

Le modèle d'émissions fournit une répartition précise des trafics inhérents à chaque scénario de mobilité. Pour chaque type de service de mobilité et chaque mode, cette répartition est fonction des technologies utilisées, des consommations d'énergie et des émissions qui y sont liées. Couplé au modèle TILT, il constitue un moyen très puissant pour explorer les différentes voies possibles afin d'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 celui-ci.

Comme nous avons pu le constater, TILT est aussi suffisamment flexible pour prendre en compte des règles d'allocation des technologies aux services de mobilité qui donnent une image beaucoup plus précise des scénarios. Ainsi, il permet de mieux aborder la construction des scénarios de mobilité durable.

Pourcentage du parc				
Buis	année démarra	2000	2025	2050
Total	-	100%	100%	100%
MCI	2005	100%	30%	0%
diesel BAU	-	100%	16%	0%
essence BAU	-	0%	0%	0%
diesel performant	2005	0%	8%	0%
essence performant	2005	0%	6%	0%
GPL	0	0%	0%	0%
GNV	-	0%	0%	0%
H ²	-	0%	0%	0%
MCI / hybride rechargeable	2007	0%	45%	10%
diesel	2007	0%	31%	7%
essence	2010	0%	13%	3%
GPL	-	0%	0%	0%
GNV	-	0%	0%	0%
H ²	-	0%	0%	0%
PAC	2015	0%	15%	70%
GNV + réformeur	2015	0%	13%	21%
méthanol + réformeur	-	0%	0%	0%
H ²	2020	0%	2%	49%
Electrique pur	2010	0%	10%	20%

Figure 19 Capture du module émissions

En outre, le module de calcul d'émissions permet également d'évaluer la consommation de carburant des modes maritimes et des modes aériens et les émissions inhérentes à cette consommation. Comme nous le verrons dans la section suivante, le module « Emissions » calcule le nombre de mouvements des navires et des avions afin de permettre de comptabiliser la consommation et les émissions liées aux ressortissants français ainsi que les tonnes en provenance ou à destination de l'économie française.

1.5.2 Emissions du transport à longue distance

Afin de pouvoir inclure dans notre analyse la consommation de carburant des activités export et import de l'économie française ainsi que les émissions qui leur sont liées, nous avons dû calculer le volume du trafic maritime et aérien pour les marchandises et passagers en provenance ou à destination de la France. Pour ce faire, nous avons utilisé les tonnes recensées par les douanes, les matrices origine-destination pour ces tonnes et les matrices des distances port à port (deux ports français -le Havre et Marseille- vers tous les autres ports du monde) et capitale à capitale (pour le transport aérien.)

Après avoir calculé ces trafics, il a été possible de calculer les mouvements et les émissions des navires liés au transport des tonnes uniquement en provenance de l'économie française ou à destination de cette dernière.

Le transport de marchandises réalisé sur des aéronefs destinés principalement au transport de passagers a été pris en compte, et sa part de la consommation de carburant et des émissions liées a été allouée au volet marchandises. En ce qui concerne le transport maritime, nous n'avons calculé que la part de la consommation de carburant et la part des émissions directement imputables aux marchandises françaises.

En France, l'organisme chargé d'établir le comptage des émissions liées au transport maritime, le CITEPA (2008), calcule les émissions maritimes par rapport à la consommation de carburant dans les ports. La quantité de carburant vendue au port est multipliée par des facteurs émissifs pour des navires moyens et le résultat est présenté de manière globale comme étant les émissions liées au transport maritime.

Pour les besoins de TILT, nous avons estimé que ce calcul était insuffisant pour deux raisons :

- il ne permet pas de connaître l'utilisation faite de ce carburant ;
- il ne permet pas de saisir la totalité de la facture énergétique du commerce français.

En effet, le carburant acheté en France ne sera pas obligatoirement consommé sur le territoire français et, de plus, il est possible que le carburant effectivement consommé sur le territoire français soit du carburant qui ait été acheté à d'autres pays. Par ailleurs, ce calcul est difficilement transposable au commerce français : Le carburant chargé n'est pas forcément en rapport avec les tonnes de marchandises que le navire chargera où déchargera.

Ces deux points prennent de l'importance quand nous considérons les aspects légaux qui les sous-tendent. D'une part, un pays est responsable de ce qui arrive à l'intérieur de son territoire et, en matière d'émissions, la tendance semble être à la responsabilisation des émissions directement liées à l'activité dans son territoire. D'autre part, nous pouvons évidemment suspecter que cette tendance évoluera pour intégrer la responsabilité des pays par rapport à leur activité, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur de leur territoire. Le droit maritime établit que la responsabilité de la pollution occasionnée sur les eaux internationales incombe à l'armateur qui, ensuite, se tourne vers son assureur pour payer la facture d'un accident de pollution. Mais, en matière d'émissions de GES qui endossera la responsabilité ?

En effet, se pose la question de savoir si l'armateur sera toujours considéré comme étant le responsable, auquel cas le calcul fait par le CITEPA sera d'une utilité plus que significative car pourront être imputées à l'armateur les émissions liées au carburant consommé. .

Afin de pallier le manque d'information concernant les émissions maritimes, nous avons créé un module capable de calculer les émissions liées au transport maritime de marchandises. Deux problèmes se posent au moment d'établir ce calcul :

- d'une part, il est impossible de déterminer avec précision si une tonne provenant de l'extérieur et qui est consommée en France a été acheminée par voie maritime, voie ferroviaire, voie d'eau ou voie routière ou en utilisant plusieurs modes. De plus, il est impossible aussi (dans l'état actuel des comptes) d'identifier le port d'arrivée ;
- d'autre part, il est impossible d'identifier les tonnes qui arrivent sur le territoire français mais qui n'y sont pas consommées car elles sont acheminées (dans l'état) vers un autre pays pour être transformées et/ou consommées.

Pour faire face à ces problèmes d'identification, nous avons dû envisager un certain nombre d'hypothèses, ce qui nous a amené à qualifier notre calcul d'estimation et non pas de comptabilité des émissions maritimes liées au transport des tonnes consommées par ou en provenance de l'économie française.

Ainsi, nous avons procédé en trois temps, en identifiant :

- la totalité des tonnes consommées par ou en provenance de l'économie française et nous les avons ordonnées par rapport aux partenaires commerciaux de la France;
- la totalité des tonnes chargées et déchargées dans chaque port français ;
- les distances entre les ports français et les ports de tous les partenaires commerciaux de la France;

Ensuite, grâce à l'identification de ces tonnes, nous sommes parvenus à identifier les tonnes arrivant dans les ports français, mais destinées à la consommation ou à la transformation dans d'autres économies que l'économie française. Ces calculs seront par la suite très utiles pour observer quel est l'impact des différentes politiques sur le trafic de transit lié au transport maritime européen.

A ce stade, nous sommes donc en possession des chiffres relatifs :

- aux tonnes consommées par ou en provenance de l'économie française arrivant aux ports français (au *prorata* de l'importance, par rapport au trafic total, de chaque port) ;
- aux tonnes consommées par ou en provenance de l'économie française arrivant aux ports étrangers.

Les séries sont ensuite comparées aux mouvements de navires de la manière suivante : chaque navire charge et décharge sa cargaison à chaque port sans toutefois la charger ou la décharger complètement. Il existe donc un taux de chargement et de déchargement moyen pour chaque mouvement par rapport à chaque port. A partir de cela, nous savons combien de mouvements de navire sont nécessaires pour acheminer la totalité du commerce international français à destination, et nous connaissons donc les besoins en matière de carburant (sur la base des facteurs d'émissions CORINAIR) et le volume des émissions liées à la totalité du commerce international français.

Nombre de mouvements-navires

	2000	2025	2050
Très Longue Distance Extra-EU			
Total	6482	8127	14744
Vrac liquide	1729	2168	3933
Vrac sec	1660	2081	3776
Conteneur	1277	1601	2904
Autres	1816	2277	4131

Longue Distance Intra-EU

Total	6122	7772	9856
Solid bulk	1671	2121	2690
Liquid bulk	1431	1817	2304
Container	733	931	1181
Autres	2286	2902	3680

Figure 20 Capture du module émissions-maritime

Comme nous l'avons précisé au début de la section, il ne s'agit pas d'une comptabilité des émissions mais d'une estimation liée au plus court chemin. C'est cette même structure qui sera utilisée pour calculer les émissions maritimes en 2050 mais, dans ce cas, ce sera le trafic déterminé par TILT (et les hypothèses qui lui sont inhérentes) qui détermineront le trafic maritime total qui, ensuite, sera réparti entre le Havre, Marseille.

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.

En ce qui concerne le calcul des émissions des aéronefs, une différenciation par rapport à la portée du vol est réalisée. Deux catégories sont identifiées : longue distance (vols allant jusqu'à 2000 Km.) et très longue distance (vols de plus de 2000 Km.). A l'intérieur de chacune de ces catégories, nous identifions trois types d'aéronefs moyens (sur la base des

études CORINAIR) par rapport au nombre de sièges offerts par chaque type d'appareil susceptible de réaliser des vols aux distances définies.

A partir de cette catégorisation, une ventilation des trafics, calculés par TILT, est opérée sur chaque échelle géographique, et la répartition entre les différents types d'aéronef est réalisée au prorata du kilométrage moyen par passager, en cohérence avec les résultats de TILT.

La ventilation des trafics permet ensuite de calculer le nombre de mouvements nécessaires pour la mobilité aérienne. De cette manière, TILT calcule les émissions des avions en CO₂ en prenant en compte le cycle complet d'un vol (décollage, vol et atterrissage).

Les hypothèses principales de ce calcul de mouvements sont :

- taux de remplissage moyen des aéronefs selon le type d'aéronef ;
- distance moyenne parcourue par type d'aéronef et zone de service ;
- nombre de tonnes chargées et déchargées par mouvement et type de navire (vrac sec, vrac liquide, container, autres) ;
- distance moyenne parcourue par type de navire et zone de service.

Ces hypothèses peuvent être modifiées par le modélisateur afin de faire apparaître des changements en matière de comportements et d'organisation. Grâce à cette méthodologie, deux leviers sont à notre disposition pour la construction de scénarios pour 2050 concernant les transports à longue distance :

- le levier de l'optimisation des routes logistiques ;
- le levier de la massification des produits.

Hypothèses générales sur les technologies

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 Pégase, Chronos et Hestia présentées ici ont été calculées sur la base d'un sentier technologique où des hybrides biénergie avec une autonomie de batterie de 200 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.

Concernant les avions, nous envisageons l'hypothèse, que d'ici 2050, la réduction de leur consommation d'énergie équivaldra 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 sont « well-to-wheel » et nous considérons que, en 2050, l'électricité est d'origine nucléaire.

Partie 2. Des scénarios de mobilité sous contrainte de facteur 4 à l'horizon de 2050 pour la France

Chapitre 1 - Considérations sur les tendances et contre-tendances

2.1.1 Tendances générales et incertitudes : la base des familles de scénarios

Au moment où le monde traverse une crise économique très profonde, nous voyons apparaître des indices qui s'orientent vers des changements mondiaux semblables à ceux qui sont préconisés dans le rapport « Mapping the Global Future » de la CIA. Ce rapport fait état d'une tendance à long terme inscrite dans une mondialisation irréversible mais qui sera moins occidentalisée.

Loin de remettre en question les travaux de prospective de la CIA, nous les prenons comme toile de fond de notre analyse backcasting, qui vise à montrer ce dont nous aurons besoin pour que le système de transport respecte l'engagement des autorités publiques françaises de diviser par 4 les émissions de GES.

Ainsi, les scénarios que nous développerons ici prendront comme point de départ les conclusions principales des travaux de prospective de la CIA et présenteront des idées qui soient à la fois cohérentes avec les tendances lourdes présentes dans ces travaux et les engagements des autorités publiques :

- une économie européenne et mondiale substantiellement plus intégrée ;
- un nombre croissant d'entreprises de taille mondiale ;
- une population vieillissante ;
- une volonté politique de rechercher un facteur 4.

Ces tendances lourdes nous permettront d'esquisser différentes familles de scénarios qui exploreront les besoins en matière de technologies et d'organisation pour arriver au facteur 4. Le but principal de chaque scénario est de faire état des détails politico-économiques concernant le sentier de réduction tout en analysant ce que le facteur 4 implique en matière de technologies et de politiques publiques ainsi que les conséquences sur le système de transport et l'économie.

Au vu des tendances lourdes qui constitueront notre point de départ, nous observerons que l'idée centrale de tous nos scénarios est axée autour d'un même principe : la productivité. En effet, deux éléments sont à prendre en considération :

- d'une part, la mondialisation de l'économie implique que les matières premières sont (et resteront) largement échangées dans un marché mondial (avec des prix fixés au niveau mondial) et donc transportées sur de longues distances. Comme nous avons évoqué dans le chapitre 2 de la première partie, cette logique de mondialisation croissante implique une amélioration de la productivité ;
- d'autre part, le rapport travailleurs/retraités devrait passer, selon les projections du rapport CHARPIN, de 1.17 en 2005 à 1.44 en 2040. Cela signifie que les travailleurs de demain auront la responsabilité de financer les retraites, et les coûts croissants de la sécurité sociale, avec une main-d'œuvre moins nombreuse.

Au delà du fait que produire plus avec moins d'inputs n'est possible qu'en augmentant la productivité, cela implique qu'il faudra être plus productif et développer une production à très haute valeur ajoutée, ce qui suppose une amélioration des technologies de production et des concentrations plus importante. En ce qui concerne le transport, cela signifie qu'il faudra réorganiser les transports pour introduire de nouvelles technologies et de nouveaux comportements qui se traduiront à la fois par une réduction des émissions et par une productivité accrue.

Ainsi, pour aller à l'essentiel, l'idée centrale qui se dégage du rapport de la CIA est qu'il faudra « faire plus avec moins ». Cet élément de départ est d'autant plus important quand on lui ajoute une autre tendance lourde : l'amélioration continue de la qualité de vie et l'allongement de la durée de vie.

En outre, si en 2050, 70% de la population est inactive (dont une grande partie à la retraite) il est certain que les services à la personne évolueront de manière importante ainsi que, liés à ces services, les flux des marchandises et des personnes.

Cette tendance renforcera la dématérialisation du PIB mais fera apparaître certaines incertitudes-clefs : les nouvelles technologies et productions à très haute valeur ajoutée des pays industrialisés seront-elles suffisantes pour les besoins de ces économies ? Verra-t-on d'importants flux migratoires (non seulement de personnes mais aussi de marchandises) et, de ce fait, verrons-nous des changements importants dans les habitudes de transport ?

En outre, le fait que la globalisation et les mécanismes du marché poussera à une concentration de plus en plus importante de l'économie entre les mains d'entreprises de très grande taille, elle poussera aussi à une concentration de pôles de travail et donc d'habitation. Cette concentration sera, de plus, renforcée par le vieillissement de la population, qui est souvent accompagnée d'abord par une hausse de la mobilité puis d'une réduction de la mobilité et d'un accroissement de la demande de services à la personne qui requièrent (de manière plus ou moins importante) une proximité accrue. Ces concentrations organisées constitueront aussi un facteur important dans l'utilisation des transports en commun.

Dans ce cadre, il ne faut pas perdre de vue que, tout comme lors de la Révolution industrielle, c'est l'élévation sensible de la productivité conjuguée à la baisse des coûts et des prix qui explique, selon F. PERROUX, la dimension et la forme des flux de services achetés. Il est fort possible que le caractère nécessaire d'une continuité dans l'augmentation de la productivité provoque à un nouveau changement important de la dimension et de la forme des flux.

Tous ces éléments de réflexion seront utilisés dans nos scénarios comme des tendances lourdes, auxquelles nous pouvons aussi ajouter des incertitudes-clefs qui se réfèrent à

l'adaptation de l'économie française. Ainsi, plusieurs questions viennent à l'esprit quand nous commençons à analyser ce que signifie le facteur 4. La mutation de l'économie de la France se fera-t-elle sur la base de nouvelles compétences ? Comment se transformera le paysage des localisations des entreprises sur la base des tendances lourdes et comment s'opéreront les changements au niveau des comportements ? De quelle manière la disponibilité de certaines énergies modifiera-t-elle le paysage du pays et la mobilité des personnes et des marchandises ? Quelle forme urbaine devons-nous planifier pour avoir un niveau de mobilité en rapport avec nos besoins ? Quelle réglementation faudra-t-il imposer aux transports ? Quelles normes technologiques seront nécessaires ? Quel type de chaîne logistique répondra aux besoins des entreprises ? Quel type de réseau de transport en commun devra-t-il être mis en place ?

De manière générale, les incertitudes clefs qui surgissent peuvent se résumer en trois groupes :

- des incertitudes concernant la technologie ;
- des incertitudes concernant l'organisation du système ;
- des incertitudes concernant les besoins en matière d'infrastructures ;

Il est certain que ces incertitudes sont en partie dues au fait que nous ne pouvons pas connaître par avance la politique publique qui sera menée. Il est donc clair pour nous qu'une des parties les plus importantes de la scénarisation repose sur la capacité de celle-ci à faire ressortir des éléments de réponse concernant les politiques publiques, notamment :

- sur les budgets monétaires du transport (taxation, tarification) ;
- sur les budgets temps de transport ;
- sur les infrastructures nécessaires pour les transports.

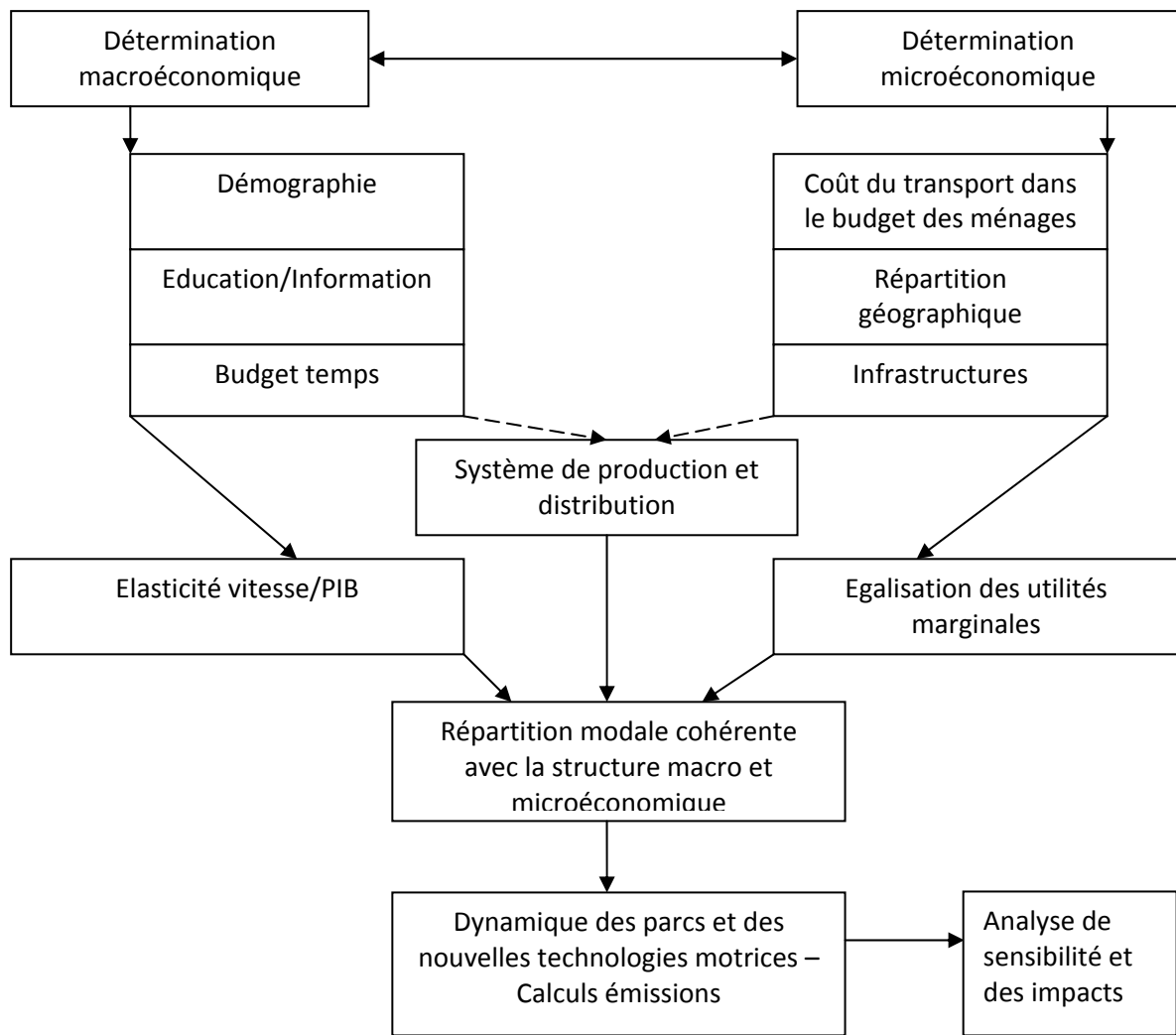
Ces trois composantes étant, de toute évidence, liées, nous ne chercherons pas à définir des scénarios sur la base de l'une ou de l'autre, mais plutôt à définir quel devrait être le degré de changement induit par ces trois composantes du système de transport. Par conséquent, nous chercherons à déterminer, pour chaque scénario, une cohérence respectueuse des contraintes micro et macroéconomiques. Elle s'établira à partir du modèle TILT, dont l'objectif est de fournir des résultats concernant les besoins en matière de transport et de services

énergétiques. Toute la logique de TILT est fondée sur l'idée d'interaction entre activité économique, besoins en transport et choix microéconomiques, en tenant compte de la situation nationale (croissance) et internationale (globalisation), mais aussi des coûts de production, des coûts de transport, des niveaux de formation, de productivité, etc.

TILT peut être qualifié de modèle « démo-économique ». La relation entre variables démo-économiques et émissions est établie par l'intermédiaire de modules de calcul des trafics selon les modes. Le module de calcul des consommations énergétiques et des émissions liées est branché sur le couple évolution des trafics et évolution du parc. En outre, la logique « backcasting » de TILT nous fournit les moyens d'établir des rapprochements entre les déterminants macroéconomiques, les éléments sur les innovations technologiques et les facteurs microéconomiques du système de transports.

Ces rapprochements permettent d'illustrer les ruptures et les inflexions que chaque scénario implique tout en analysant les besoins en matière de changement et de transformation nécessaires pour maintenir un système cohérent et équilibré.

Nous attacherons une importance particulière à la clarté des détails macro/micro économiques, politiques et technologiques de chaque scénario, cela avec les objectifs suivants : offrir des éléments d'aide à la décision qui soient pertinents et cohérents. Ainsi, au lieu d'envisager une optique artistique de représentation de la réalité, il paraît prudent et intéressant d'aborder les scénarios comme une perception formée par des certitudes relatives, des incertitudes-clefs et un objectif final certain (facteur 4 en 2050). Notre travail s'efforcera de donner plus de précision sur ces éléments afin d'analyser les besoins (et non les nécessités) technico-organisationnel(le)s pour parvenir au facteur 4.



H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Figure 21 Structure opérationnelle de TILT

Ces détails seront identifiés à travers l'analyse des tendances et des incertitudes qui se réfèrent à l'évolution de trois volets de la socio-économie des transports :

- l'évolution de la population ;
- l'évolution du tissu microéconomique ;
- l'évolution macroéconomique.

2.1.2 De 2000 à 2050, quels développements et quelles hypothèses ?

En 2008, le groupement LET-ENERDATA a établi trois familles de scénarios sur la base du type d'action publique que l'on préconise pour arriver au facteur 4 :

- favoriser la réglementation stricte (Pégase) ;
- favoriser la multimodalité verte (Chronos) ;
- favoriser le découplage absolu (Hestia).

Ces trois familles de scénarios nous ont permis de travailler en backcasting pour définir les besoins afin de parvenir à l'objectif fixé.

- La première famille explore quelle devrait être la norme environnementale pour les véhicules en 2050 dans une situation tendancielle, dans laquelle une faible partie des politiques publiques visant à changer le mode d'organisation est mises en pratique.
- La deuxième famille vise à définir quel devrait être le niveau d'action sur l'organisation du système de transport en agissant par les composantes monétaire et infrastructurelle afin d'obtenir un report modal qui puisse soulager les contraintes sur la réglementation des véhicules, voire permettre une expansion du transport des marchandises et/ou du secteur aérien.
- La troisième famille explore l'idée d'un découplage absolu entre la progression du PIB et celle du besoin en matière de vitesse inhérent à l'augmentation des distances de parcours (que ce soit pour les passagers ou les marchandises).

En procédant ainsi, nous pouvons, à travers les différentes familles de scénarios, chercher à savoir quelles combinaisons de technologies et quels changements organisationnels (que ce soit par la composante monétaire, par la composante temporelle ou par la composante infrastructurelle) sont possibles.

De cette manière, nous disposons, à l'intérieur de la famille de scénarios technico-organisationnels d'un grand nombre de scénarios particuliers selon que l'on choisit :

- d'introduire de nouvelles technologies non-polluantes ;
- d'avoir une utilisation accrue des technologies non-polluantes existantes ;
- de promouvoir une baisse de la demande générale.

Ces trois scénarios ont été établis sur les bases des observations passées ainsi que sur la capacité des politiques publiques particulières à devenir des tendances à long terme. Ils sont tous cohérents avec un équilibre entre économie, vitesses, offre modale et infrastructures nouvelles, mais ne prennent pas en compte les infrastructures et les sentiers des politiques publiques.

L'analyse exploratoire des scénarios, réalisée en 2008, est très complète et présente trois scénarios contrastés qui parviennent à faire ressortir les options envisageables à long terme. Cependant, la nature du travail effectué sur ces scénarios n'a pas permis de faire apparaître les effets des politiques publiques à la fois sur les infrastructures, les investissements et l'économie. Ainsi, nous explorerons la dimension des 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'infrastructure (au niveau des décisions microéconomiques) dans une modélisation backcasting macroéconomique, nous déterminerons quels seraient les effets des différentes politiques économiques sur les comportements et les transports. De cette manière, nous pourrions évaluer les impacts des politiques publiques et leur degré d'efficacité en matière d'empreinte environnementale.

Par conséquent, les scénarios s'insèrent dans une vision du futur qui prend en compte les équilibres existants, construits sur la base des décisions passées. Ainsi, depuis plus de dix ans nous observons que l'offre d'infrastructures nouvelles pour la voiture a permis de maintenir une certaine stabilité sur la vitesse routière.

Si nous analysons le nombre de kilomètres construits entre 1993 et 2003, nous observons que le nombre de kilomètres d'autoroute supplémentaire a augmenté, à raison de 3,3% de taux de croissance annuelle moyenne alors que celui des routes n'a augmenté que de 1,6% par an. Au

cours de la même période, le parc de véhicules a augmenté de 1,8% par an avec un taux de remplissage qui reste relativement stable.

Année	Autoroutes		
	Routes Km.	Km.	Total Km.
1990	801274	6824	808098
1991	881360	7080	888440
1992	908243	7408	915651
1993	908212	7614	915826
1994	955251	7956	963207
1995	951097	8275	959372
1996	960561	8596	969157
1997	964646	8864	973510
1998	971064	9303	980367
1999	975298	9626	984924
2000	979330	9766	989096
2001	987014	10068	997082
2002	984131	10223	994354
2003	987622	10379	998001
TCAM	1,6%	3,3%	1,6%

Sources: Les comptes des transports, Eurostat, INSEE

Tableau 1 Evolution des routes et autoroutes

Pendant cette même période, le kilométrage moyen par voiture a augmenté jusqu'en 1994 pour diminuer ensuite de manière soutenue. En même temps, le nombre des voyageurs-kilomètres a augmenté fortement. Cela signifie que la longueur des déplacements a également augmenté (de manière différente pour chaque type de mode et pour chaque motif).

Année	Parc milliers	Gvoy.Km	Tx	
			remplissage	Km. moyen
1990	23550	586	0,54	13503
1991	23810	591	0,55	13608
1992	24020	606	0,55	13905
1993	24385	611	0,56	13943
1994	24900	623	0,56	14137
1995	25100	640	0,55	13948
1996	25500	649	0,55	13922
1997	26090	659	0,55	13825
1998	26810	679	0,55	13849
1999	27480	700	0,55	13930
2000	28060	700	0,55	13646
2001	28700	728	0,55	13875
2002	29160	733	0,55	13765
2003	29560	739	0,55	13674
TCAM	1,8%	1,8%	0,1%	0,1%

Sources: Les comptes des transports,
Eurostat, INSEE

Tableau 2 Evolution du parc véhiculaire et kilométrage

Il est intéressant d'observer que, dans la même période que celle retenue dans le tableau précédent, le temps de transport est resté stable. Il est donc cohérent –par rapport à ces observations- d'arriver à la conclusion que ce sont les vitesses des transports qui ont changé.

En min/voy.j	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	TCAM 1993
												2003
Route	26,4	26,7	27,1	27,2	27,6	28	28,4	28	28,8	28,8	29,4	1,10%
Fer	3,3	3,2	2,9	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	0%
Air	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,20%
Modes doux	12,8	12,5	12,3	12,1	11,9	11,7	11,5	11,3	11,1	10,9	10,7	-1,70%
Total	42,6	42,5	42,4	42,5	42,7	43	43,3	42,8	43,4	43,2	43,5	0,20%

Tableau 3 Temps passé dans les transports par jour et par passager (en min/voy.j)

Dans ce sens, le tableau 4, présente les calculs d'impact réalisés en 2004 par les Comptes de Transport, qui font état des facteurs expliquant la hausse des distances de transport depuis 1993.

En%/an	Effet trafic	Effet vitesse	TCAM 1993-2003
Route	1,4	-0,3	1,1
Fer	0,6	-0,6	0
Air	0,2	0	0,2
Modes doux	-1,7	0	-1,7
Total	0,5	-0,2	0,2

Source: Les comptes des transports

Tableau 4 Décomposition par effet du TCAM du temps total passé dans les transports par jour et par passager

Il est aussi très intéressant d'observer que le même effet est présent dans le transport de marchandises. En effet, depuis plus de dix ans, nous observons une hausse très limitée du temps de transport pour les marchandises car il est largement restreint par l'effet vitesse du réseau des transports.

En Gt.h	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2003
Route	2,9	3,04	3,21	3,26	3,34	3,36	3,5	3,48	3,6	3,58	3,6	2,20%
Fer	1,41	1,52	1,5	1,56	1,7	1,7	1,68	1,79	1,63	1,61	1,51	1%
Fluvial	0,54	0,51	0,53	0,52	0,52	0,56	0,62	0,66	0,61	0,63	0,63	1,50%
Total	4,85	5,07	5,24	5,34	5,56	5,62	5,8	5,93	5,84	5,82	5,74	1,70%

Source: Les comptes des transports

Tableau 5 Temps total passé dans les transports pour les marchandises (en Gt.h)

En%/an	Effet trafic	Effet vitesse	TCAM 1993-2003
Route	3	-0,9	2,2
Fer	0,7	0	0,7
Fluvial	1,5	0	1,5
Total	2,2	-0,5	1,7

Source: Les comptes des transports

Tableau 6 Décomposition par effet du TCAM du temps total passé dans les transports pour les marchandises

Il est important de souligner que cette stabilité de la vitesse dans le transport de marchandises n'a pas eu le même impact sur tous les types de marchandises de la même manière. Si nous

calculons le nombre de kilomètres parcourus par les pondéreux (acier, aluminium, ciment, verre) et la pétrochimie consommés en UE15, nous observons qu'ils sont restés stables depuis plus de vingt ans.

En effet, si nous observons la figure 22, nous pouvons constater que le ratio :

$$\frac{(\text{TKM nationaux sans produits énergétiques} + \text{TKM internationaux des pondéreux, machines et manufacturés})}{(\text{Tpondéreux} + \text{Tmachines et manufacturés})}$$

est stable au niveau européen mais est plutôt orienté à la hausse au niveau de chaque pays. Cela nous amène à nous poser la question de l'origine de cette stabilité au niveau européen.

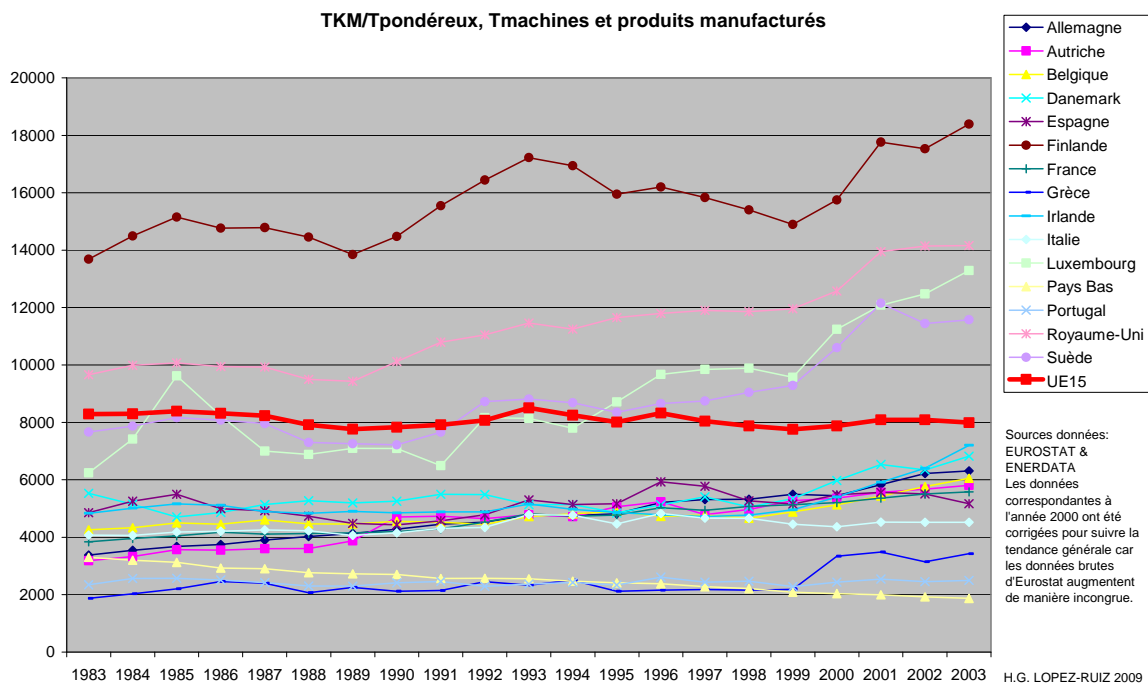


Figure 22 Ratio TKM /Tonnes des pondéreux pour l'Europe

Ainsi, si nous regardons de plus près, dans la figure 23, nous constatons cela avec un tableau présentant une analyse plus ciblée.

Le ratio $\frac{\text{TKM totaux sans produits énergétiques}}{\text{Tmachines et produits manufacturés}}$ fait apparaître une situation de hausse régulière du ratio, à la fois, au niveau européen et à l'intérieur des différents pays de l'UE15.

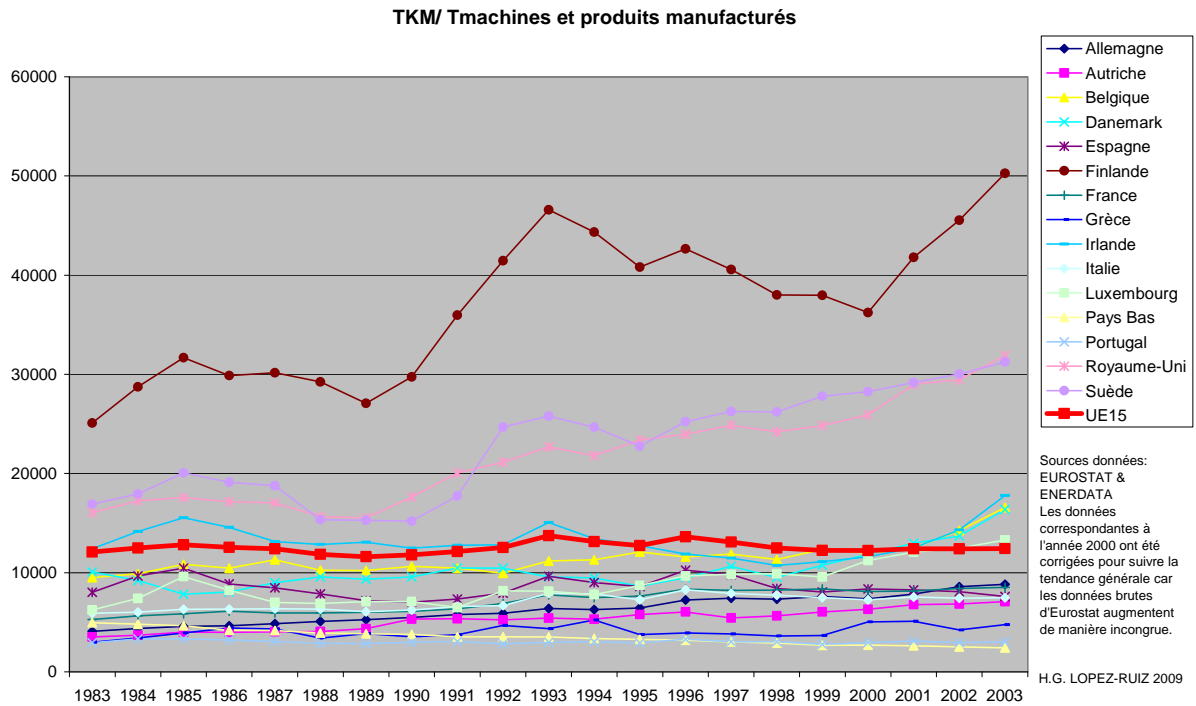


Figure 23 TKM/ Tmachines et produits manufacturés

En revanche, si l'on observe le ratio $\frac{\text{TKM totaux sans produits énergétiques}}{\text{Tpondéreux}}$ dans la figure 24, nous observons que ce ratio est en baisse.

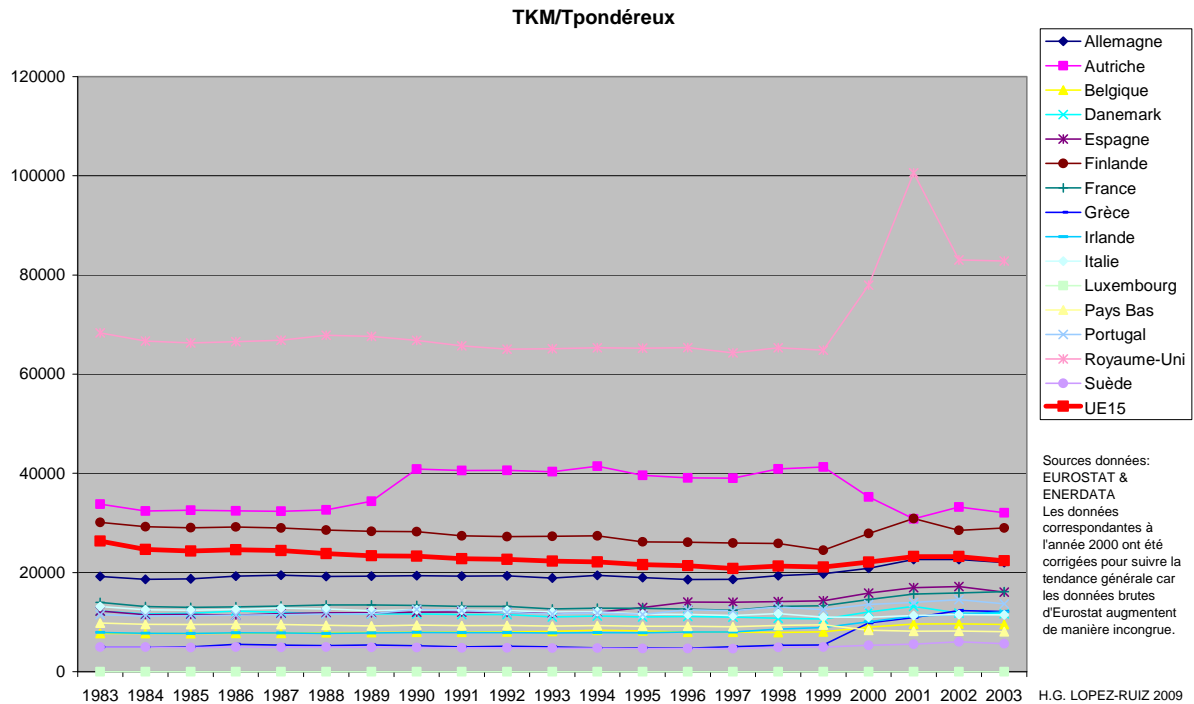


Figure 24 TKM/T pondéreux

Cela signifie qu'au même moment où le nombre de TKM en Europe et à l'intérieur des pays européens augmente, le transport des marchandises à haute valeur ajoutée et des marchandises à basse valeur ajoutée évolue différemment. En effet, les distances parcourues par les pondéreux, qui n'ont pas une très haute valeur ajoutée, ont, sinon diminué, du moins augmenté de manière moins importante que les TKM globaux. Cela pourrait être imputé à une baisse de la consommation des pondéreux en Europe, mais si l'on analyse la figure 25, nous observons que la consommation de ces produits est en hausse.

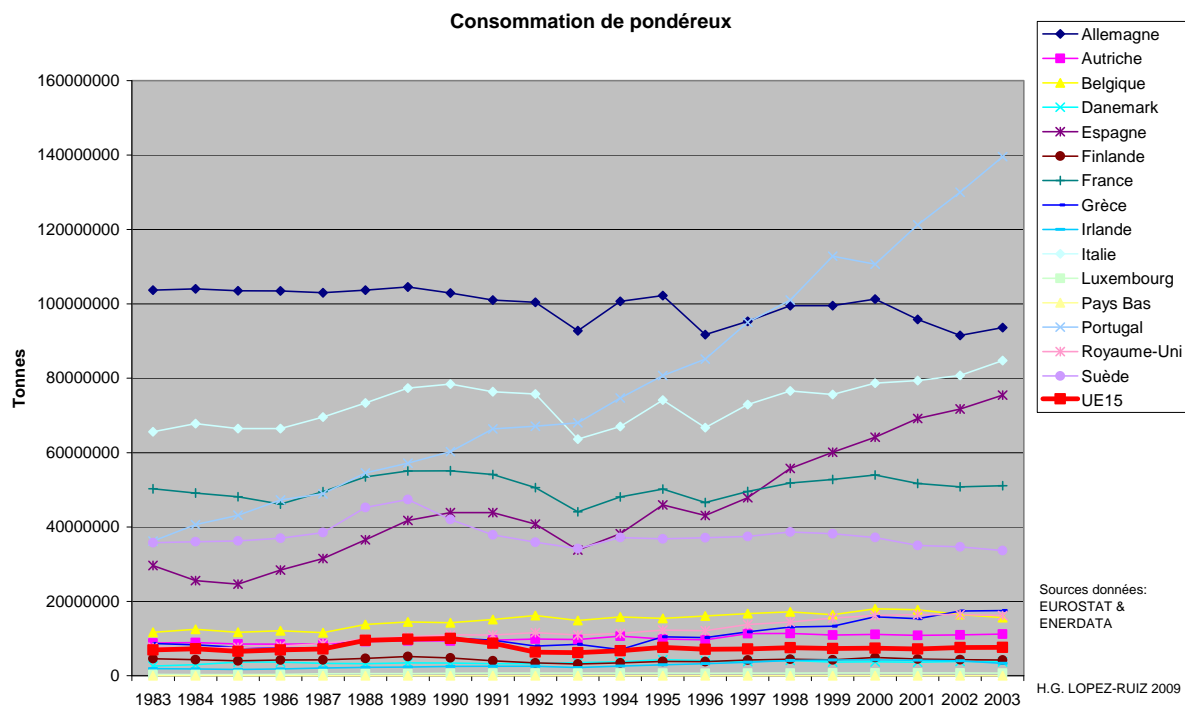


Figure 25 Consommation de pondéreux

Ainsi, à partir de cette analyse, nous pouvons clairement conclure que la hausse des TKM en Europe est due à la hausse du kilométrage liée à la consommation des produits manufacturés à l'import et à l'export. Cela signifie que la structure de production au niveau européen n'a pas fondamentalement changé depuis au moins vingt ans, et que l'Europe n'a pas connu un éclatement de son appareil productif. En revanche, la croissance du transport des marchandises a été, de toute évidence, tirée par la croissance du transport des produits manufacturés (à l'intérieur et à l'extérieur de l'Europe, en import et en export).

Tonnes d'équipement, machines en produits manufacturés à l'import et à l'export au niveau intra et extra européen

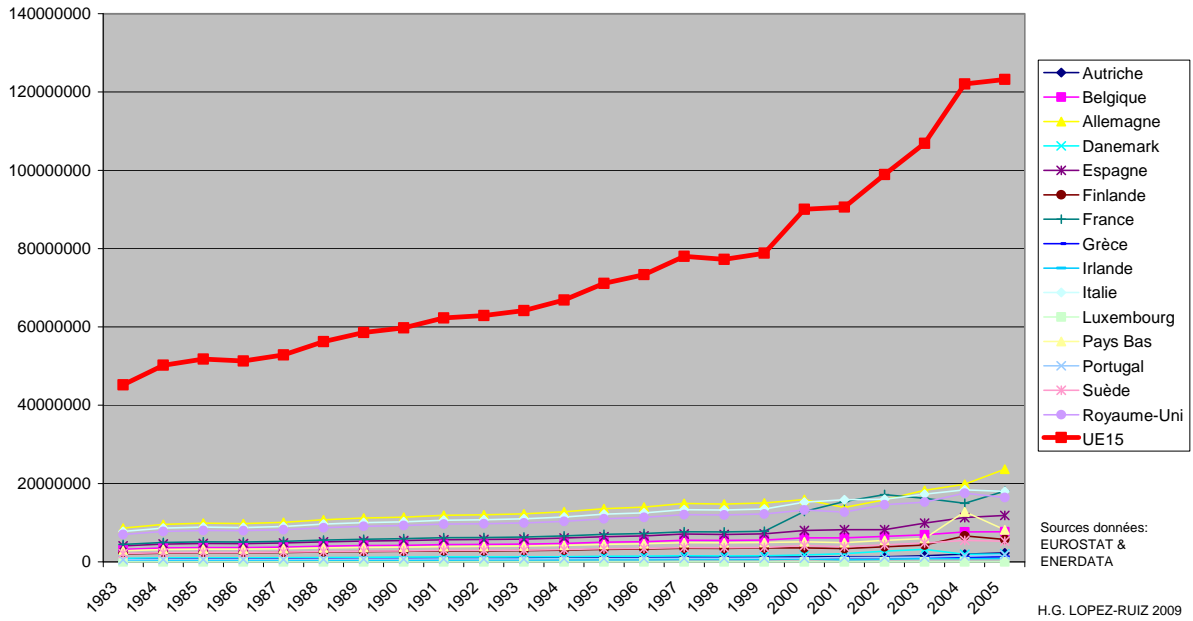


Figure 26 Consommation d'équipement, machines en produits manufacturés

Comme nous pouvons l'observer dans les figures 25 et 26, même si la consommation de biens manufacturés a fortement augmenté en Europe, les distances parcourues par ces produits ont augmenté plus que leur tonnage.

GTKM maritimes intra et extra européen d'équipement, machines en produits manufacturés à l'import et à l'export

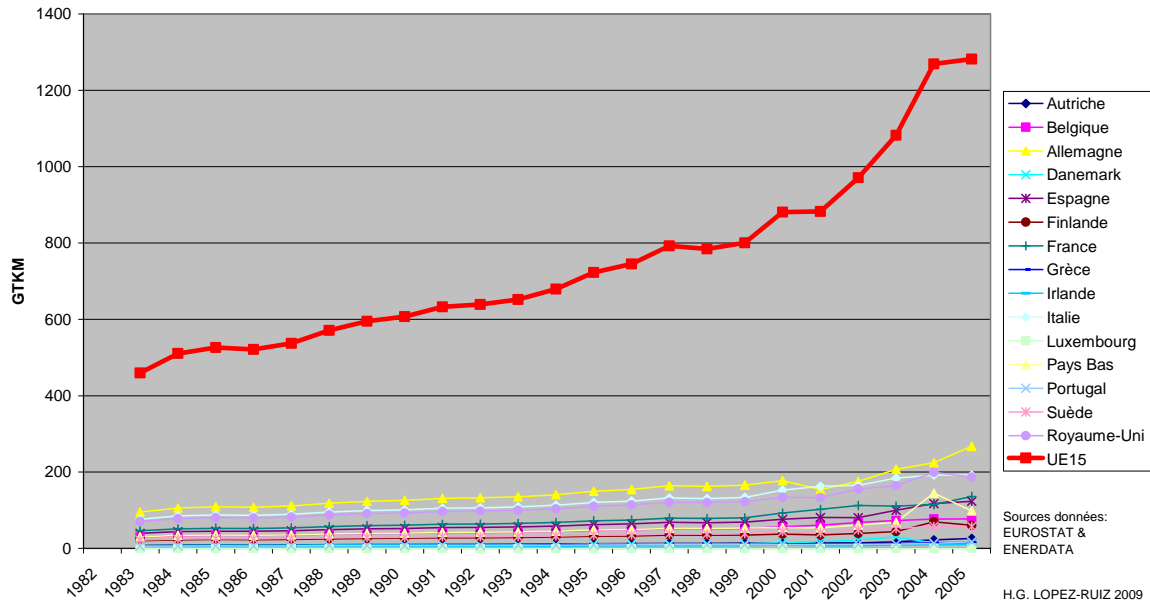


Figure 27 GTKM d'équipement, machines en produits manufacturés.

A partir de ces éléments, nous pouvons déduire que, depuis dix ans, le développement du transport en France s'est caractérisé suivant une logique triple :

- les nouvelles routes et la vitesse qu'elles proposent ont permis au temps de transport des passagers et des marchandises de rester stable ;
- l'offre des TC en ville a ouvert de nouveaux marchés, mais la lourdeur des investissements et la lenteur avec laquelle ils sont réalisés a laissé libre la voie au développement tendanciel des transports routiers ;
- la différence se fait sur la longue distance où, même si nous observons la croissance la plus importante en offre d'infrastructures, le transport routier stagne et laisse de plus en plus la place à des modes rapides, dont le prix relatif ne cesse de diminuer.

A cette logique de développement de la structure du transport vient s'adosser une cohérence microéconomique résumée par la structure des coûts de transport et de niveau de service des infrastructures correspondant aux déterminants microéconomiques de la demande de l'année de base (2000). A partir de ces déterminants microéconomiques, TILT mettra en relation la structure de la demande de l'année de base avec la structure macroéconomique du scénario en 2050. Cette première mise en relation permet de faire apparaître des éléments de réflexion sur

ce que veut dire le scénario proposé tout en conservant l'hypothèse de constance de la structure des budgets de transport dans le long terme. L'intérêt de l'exercice est de faire apparaître des ruptures et des inflexions, qui s'imposent comme nécessaires pour aboutir à une structure cohérente et soutenable à long terme.

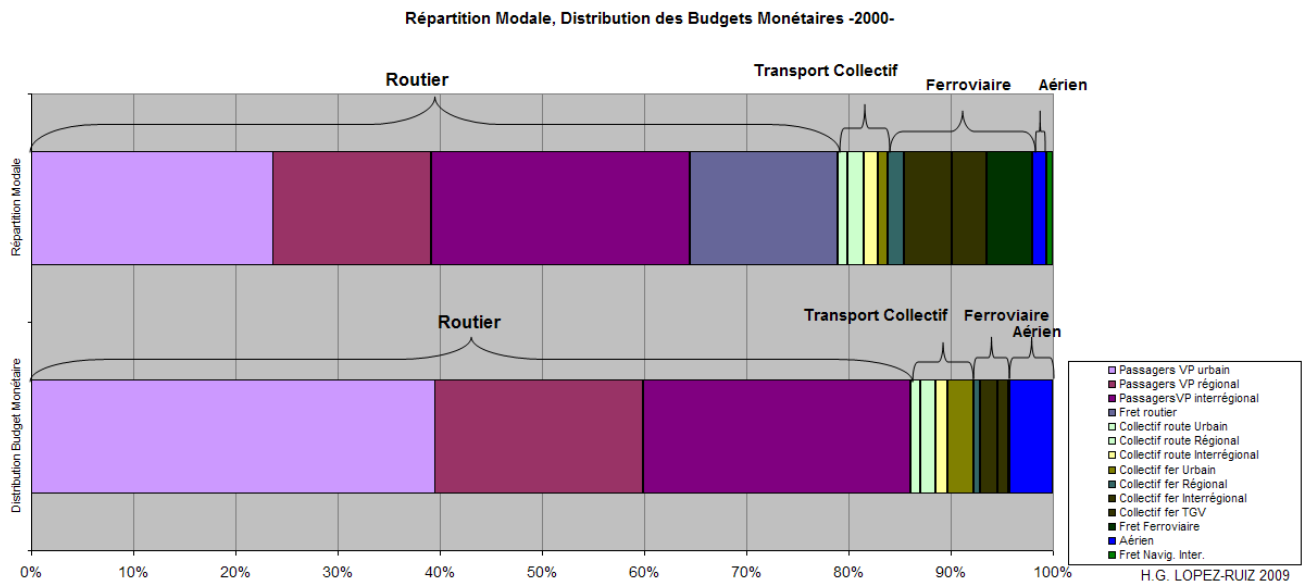


Figure 28 Distribution du budget des ménages et répartition modale

La figure 27 fait apparaître la structure de coûts de l'année de base, cohérente avec une situation où la plupart des dépenses en transport se font sur le routier en urbain, en régional et en interrégional. Le niveau d'optimisation des infrastructures n'est pas présenté pour l'année de base (car nous supposons les infrastructures de l'année de base comme une donnée de

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005 (sd)	2006 (p)
071 Achats de véhicules	5,4	4,8	4,9	4,3	4,7	4,4	4,7	3,9	4,3	4,6	4,4	4,5	4,3	4,0	4,0	4,0	3,8
072 Dépenses d'utilisation de véhicules	8,3	8,3	8,2	8,3	8,5	8,7	8,6	8,8	8,7	8,8	9,0	8,7	8,7	8,6	8,7	8,9	8,8
0721 Pièces détachées et accessoires	2,1	2,2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,6
0722 Carburants et lubrifiants	3,5	3,4	3,3	3,4	3,4	3,4	3,5	3,6	3,4	3,5	3,8	3,5	3,3	3,3	3,3	3,5	3,5
0723 Entretien et réparations	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,8	1,8
0724 Autres services liés aux véhicules personnels	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
073 Services de transports	1,8	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	2,0	1,9	2,0	2,0	2,1
0731 Transports de voyageurs par rail	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
0732 Transports de voyageurs par route	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5
0733 Transports de voyageurs par air	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
0734 Transports de voyageurs par mer et voies d'eau intérieures	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0735 Titres de transports combinés et autres achats de services de transports (transports urbains de voyageurs)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
0736 Autres services de transports achetés à l'exclusion des assurances-voyages (remontées, déménagement)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
07 Transport	15,5	14,8	14,9	14,3	14,9	14,8	15,1	14,5	14,8	15,4	15,4	15,2	14,9	14,5	14,7	14,9	14,7

Source: Les comptes des transports

Tableau 7 Evolution du budget transport des ménages

départ qui n'a pas subi une optimisation), mais l'analyse numérique réalisée fait apparaître un niveau de service des infrastructures fluide sur la plupart des infrastructures de transport.

En Mds€	Modes	Année 2007
Investissement	Route	12
	Fer	2
	TU+TCNU	2
	Autres	1
	Total	18
H.G. LOPEZ-RUIZ 2009		
Source: Comptes transports		

Tableau 8 Dépenses de fonctionnement et investissements

Tous les éléments que nous venons de présenter sur l'évolution de la structure de transport et sur son état actuel nous serviront d'appui pour développer nos scénarios pour 2050. Il paraît évident qu'en faisant évoluer cette base de travail dans le temps, à travers des scénarios prospectifs, plusieurs questions commenceront à émerger sur les tendances et les incertitudes à long terme. A ces questions, il faudra apporter des réponses qui intègrent les mesures préconisées par le Grenelle de l'environnement (2008) et qui évoluent dans un cadre cohérent avec les travaux de la CIA (2008).

Ces évolutions annoncées, qui relèvent plutôt du schéma européen, voire mondial, se joignent à des tendances ou à des ruptures liées à la fois à la prise en compte des contraintes d'infrastructure, aux volontés macroéconomiques du pays et aux objectifs de développement régionaux à l'intérieur du pays. Parmi ces dernières :

- une économie basée sur une politique de grands projets et d'investissement dans la formation de la main-d'œuvre (ce qui aura une influence sur la productivité de l'économie, de l'épargne, de l'investissement, du taux d'activité) ;
- une volonté de remanier l'espace afin d'optimiser les services territoriaux ;
- une prise en compte de la forme des villes/métropoles afin de faire ressortir une analyse plus fine et appliquée à la réalité ;

Ces trois points peuvent être assimilés à des objectifs qui détermineront la tendance générale des politiques publiques à venir. Tous sont, bien évidemment, dominés par une volonté politique et sociale de diviser par 4 les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, il est possible

d'envisager que les politiques publiques de relance et d'organisation territoriale soient soutenues par des mesures d'accompagnement afin de respecter la contrainte du facteur 4.

De cette manière, la question centrale du développement économique repose sur l'amélioration de la compétitivité des zones métropolitaines, ce qui suppose une action directe dans plusieurs domaines : les infrastructures/aménagement des espaces, les styles de vie, les pratiques de gestion et le coût du transport, ces quatre domaines étant fortement liés à ce que peuvent nous apporter les nouvelles technologies motrices.

Ces constats nous amènent à nous interroger à deux niveaux :

- au niveau urbain, la question essentielle que l'on doit se poser est de savoir quelle doit être l'évolution des subventions des transports publics ;
- au niveau national et international, la question est de déterminer la voie à suivre dans le développement de nouvelles infrastructures de transports à haute vitesse capables d'entrer en concurrence avec le transport routier et aérien.

Toutes ces questions seront abordées dans les trois scénarios tout en identifiant les mesures d'accompagnement qui devraient -avec les politiques publiques identifiées- donner lieu à des « sentiers de politiques publiques » différents pour chaque scénario et qui visent une réduction du CO₂ en agissant sur différents canaux socio-économiques. Dans tous les cas, un sentier de politiques publiques sera nécessaire pour aborder la question du facteur 4.

C'est ici qu'apparaît l'importance de quantifier les impacts des politiques publiques et de chiffrer les besoins à fournir- en investissements et en effort - pour parvenir aux objectifs souhaités.

C'est dans cette optique que nous partons de la base des scénarios LET-ENERDATA de 2008 –qui représentent un degré croissant de contrainte sur le système- afin d'atteindre à l'objectif imposé en 2050 avec une technologie donnée.

Chapitre 2 - Scénario Pégase - Favoriser la réglementation stricte

2.2.1 Modélisation du trafic

Le scénario Pégase suppose que l'évolution du système de transports est tendancielle. De cette manière, nous sommes amenés à envisager la poursuite de la mobilité accompagnée d'une continuité dans la déconcentration spatiale des activités productives sur le territoire français et européen. Dans ce cas de figure, les distances moyennes parcourues par les passagers et les marchandises continuent à augmenter. Cette augmentation des distances joue sur la répartition modale du trafic et intègre, au cœur du scénario, l'idée du développement de chaînes logistiques intégrées porte-à-porte basées sur des solutions de transport à haute vitesse axées sur des technologies d'aide à l'optimisation.

Nous pouvons supposer que le développement de ce scénario sera axé sur les infrastructures ainsi que sur l'équipement et, particulièrement, sur leur fonctionnement optimal. De ce fait, trois problématiques principales émergent :

- la construction et l'optimisation des infrastructures ;
- le développement des équipements « verts » ;
- la réglementation qui encadrera ces deux éléments.

En effet, étant donné que la société, dans ce scénario, ne connaît pas un changement important dans son mode de vie, l'effort environnemental devra porter sur le développement des nouvelles technologies et des infrastructures nécessaires pour une mobilité couplée à la croissance économique. Dans ce sens, la croissance tendancielle des besoins en matière de mobilité requiert une croissance tendancielle de la capacité des infrastructures (que ce soit grâce à l'optimisation de leur utilisation ou la construction de nouvelles infrastructures) et elle exige également un effort très important quant au développement des nouvelles technologies

et à la réglementation environnementale concernant la mobilité des personnes et des marchandises.

Aussi, la croissance tendancielle du trafic exige que l'offre de modes de plus en plus rapides soit une constante qui puisse permettre de poursuivre l'accroissement des rendements d'échelles en déconcentrant de plus en plus la production pour la localiser là où se trouvent réunies les conditions optimales de coûts, de compétences et de services.

Avec TILT, nous allons quantifier ce scénario en le fondant sur les mêmes hypothèses de sentier technologique liées au niveau de trafic de référence que celui établi dans le rapport LET-ENERDATA, de 2008. Plus précisément, nous allons calculer une distribution des trafics des différents modes en fonction des services de mobilité, de la technologie motrice et fonction du type de service de mobilité. Ainsi, le scénario Pégase sera construit en faisant des allers et retours entre les résultats et les inputs du modèle. De cette manière, nous serons alors capables de définir –dans une logique typiquement backcasting- ce dont nous avons besoin pour arriver au facteur 4. En jouant sur les variables de l'organisation et des technologies, il sera possible de redéfinir le système des transports et d'analyser les effets des différentes politiques publiques visant à modifier la répartition modale ainsi que les effets que pourraient avoir les différentes technologies motrices sur l'ensemble des émissions de CO₂.

Dans Pégase, tout repose sur une mobilité croissante des passagers et des marchandises à l'international accompagnée d'un accroissement des distances de parcours. Dans ce sens, ce scénario repose sur une extension des aires d'emploi, d'habitat et du marché. Il répond à une logique où nous continuons à faire des investissements allant dans le sens d'un développement fondé sur la vitesse et sur un coût relatif de transport peu élevé. Pégase répond à une réalité dans laquelle les passagers trouvent dans la vitesse et les bas coûts de transport le moyen d'aller toujours plus loin et dans laquelle les entreprises trouvent toujours un bénéfice à la production à grande échelle avec des coûts fonciers relativement faibles proposés par les centres de production éloignés des aires de marché.

Du point de vue du développement des technologies, ce scénario permet de tirer certaines conclusions intéressantes. Dès l'instant où les distances de parcours continuent à augmenter et

où elles sont couplées à une diminution de la concentration spatiale, la recherche et le développement en matière des nouvelles technologies de transport devraient plutôt être orientés vers des investissements concernant la consommation des véhicules, notamment sur les très longues distances.

Dans Pégase, la route continuera à jouer un rôle important au niveau du transport sur des distances de plus en plus longues. Cela devrait se traduire soit par l'établissement d'un réseau européen d'approvisionnement en nouveaux carburants (s'il y a changement de carburant) soit par la recherche d'une production énergétique embarquée efficace.

Ce scénario repose sur de très grandes attentes au niveau technologique et, à ce titre, nous avons exploré quelles seraient les conséquences de l'entrée des technologies hybrides dans le système de transport. Pour ce faire, nous avons réfléchi aux besoins à satisfaire en matière de technologies pour arriver à un facteur 4.

Pégase est fondé sur une relation étroite - soulignée par SCHAFER (2001)- entre BTT, vitesse et distance totale parcourue. Au fur et à mesure que progresse le PIB, la nature de la demande de mobilité des passagers se modifie. Le couplage entre croissance économique et distance parcourue s'opère 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 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 SCHAFER, se situe aux alentours de 0,33 pour les passagers et de 0,6 pour les marchandises. 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 évidemment, un problème de soutenabilité environnementale, compte tenu de la consommation énergétique du transport aérien et sa capacité émettrice de CO₂.

Cette structure de la croissance du PIB est cohérente avec une augmentation des vitesses générales du système. Dans ce cadre, et par rapport à la croissance de la mobilité, les vitesses modales se ventilent comme suit :

Caracteristiques		2000	Pégase 2050
ROUTIER			
<i>Marchandises</i>	<i>Km/h</i>		
	<i>Routier national</i>	50	60
	<i>Routier international</i>	-	50
<i>Passagers</i>	<i>Km/h</i>		
	- VP urbain -	23	30
	- TC urbain -	20	24
RAIL			
<i>Marchandises</i>	<i>Km/h</i>		
	<i>Rail national</i>	40	40
	<i>Rail International</i>	-	40
<i>Passagers</i>	<i>Km/h</i>		
	- VP région-	58	67
	- TC région -	58	68
MODES RAPIDES			
<i>Marchandises</i>	<i>Km/h</i>		
	<i>Rail+Avion national</i>	40	63
	<i>Rail+Avion international</i>	-	70
<i>Passagers</i>	<i>Km/h</i>		
	- VP inter-région -	110	115
	- TC inter-région -	80	90
	- TGV inter-région -	250	250
	- Avion -	500	500
TOTAL			
<i>Marchandises (nat/inter)</i>	<i>Km/h</i>	43	54/52
<i>Passagers</i>	<i>Km/h</i>	45	50
Elastictés			
Vitesse/PIB		-	0,33
T.Km/GDP Intérieur		-	0,6
T.Km/Commerce Internat.		-	1,6
Macroéconomie			
Population		64	67
Taux de croissance du PIB			1,5
Enfants par foyer		2,19	2,15
Indice de productivité		100	225
BTT		1	1

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 9 Hypothèses du scénario

Dans ce scénario, TILT calcule qu'il faut accorder, par le biais des vitesses de déplacement des passagers, une très grande importance aux déplacements à longue distance, dont on peut considérer que la plupart sont effectués en TGV ou en avion.

Dès l'instant où le système des transports connaîtra une réorganisation et où il bénéficiera 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 : les passagers et les marchandises pourront aller plus loin dans le même temps de transport pour un coût marginal réduit ;
- une possibilité d'ouverture de nouveaux marchés et de nouvelles destinations.

En ce qui concerne les marchandises, ce double effet entraînera comme conséquence une réduction du prix du produit, ce qui aura un impact sur la demande du produit et, par conséquent sur la quantité transportée. En même temps, augmenter l'aire de marché potentielle permettra d'augmenter les quantités requises pour saturer les nouveaux marchés. En ce qui concerne les passagers, proposer une vitesse améliorée permettra d'aller plus loin dans le même temps et donc d'augmenter l'accessibilité à partir d'un point donné. De cette manière, les passagers étendront eux aussi leur aire de marché (travail, consommation, loisir, etc.) pour un prix réduit, ce qui leur permettra de consommer davantage d'autres produits.

Dans ce mouvement d'ensemble, le transport routier conserve 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, hypothèse que nous lèverons dans les autres scénarios. En outre, les transports à grande vitesse comme l'avion et le TGV gagnent du terrain car ils offrent une amélioration importante de la vitesse.

GTKM/GPKM		2000	Pégase 2050	
URBAIN	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	39	62
		- Urbain routier -	39	62
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	283	373
		- VP urbain -	263	279
		- TC urbain -	20	94
REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	34	54
		- Région routier -	34	54
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	192	378
		- VP région-	173	284
		- TC région -	20	94
INTER-REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	254	408
		- Inter-région routier -	197	288
		- Inter-région rail -	50	59
		- Inter-région nav. Intérieure -	7	10
	<i>Passagers</i>	- Inter-région modes rapides -	-	51
		- TOTAL GPKM -	363	639
		- VP inter-région -	280	200
		- TC inter-region -	22	32
		- TGV inter-region -	33	177
		- Avion -	29	230
TOTAL	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	327	525
		<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	838

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 10 Répartition du trafic passagers et marchandises

Pour le transport des marchandises, la vitesse moyenne de déplacement passe de 43 Km/h en 2000 à 54 Km/h en 2050, compte tenu de la croissance du PIB et de l'élasticité de la vitesse au PIB. Pour le transport des passagers, la vitesse moyenne passe de 45 Km/h à 50 Km/h. Pour atteindre ces moyennes, il existe une variété de combinaisons possibles entre les vitesses unitaires par mode 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 tendanciennes du CGPC, 2006), tout en prenant en compte des évolutions réalistes sur les vitesses par mode, en particulier pour la route. Ainsi, en considérant que la vitesse moyenne sur la route croît elle-même de manière importante, la vitesse moyenne du rail conventionnel 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.

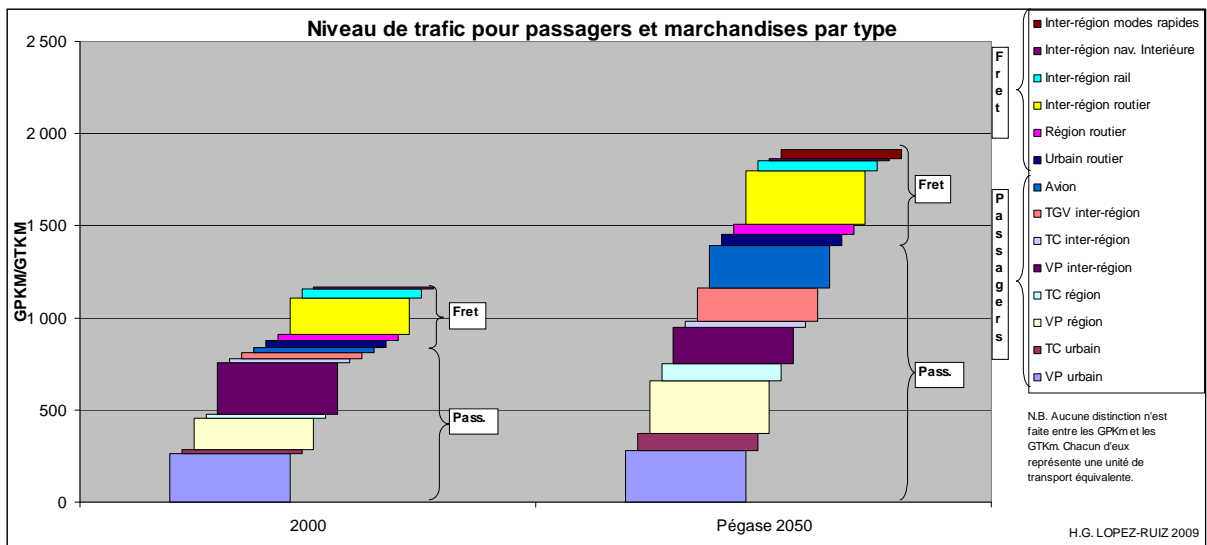


Figure 29 Trafic par type -passagers et marchandises-

Il est important de remarquer que, pour le transport de marchandises, nous envisageons l'hypothèse que le transport urbain et régional de marchandises est entièrement réalisé par la route. Comme nous pouvons l'observer, le trafic qui croît le plus sur la période est le trafic interrégional. Cela est dû au fait que l'offre croissante en vitesse ouvre de nouvelles possibilités à la fois pour les passagers et pour les marchandises.

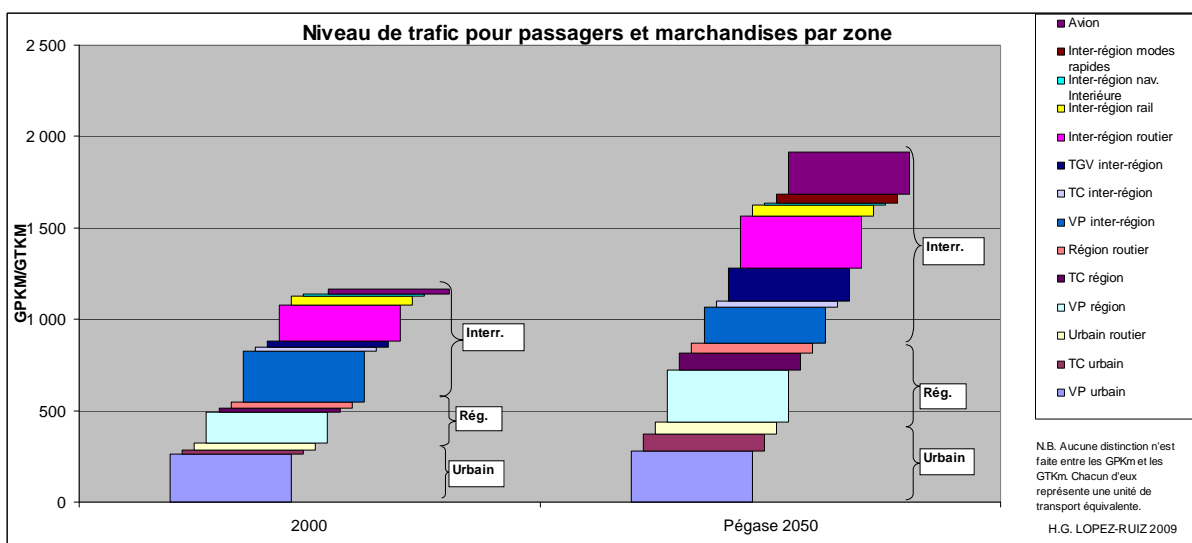


Figure 30 Trafic par zone -passagers et marchandises

Du point de vue du trafic international, nous reprenons les hypothèses du CGPC concernant le commerce extérieur et nous considérons une évolution tendancielle des vitesses par rapport au PIB. L'ouverture de nouvelles routes maritimes permet d'augmenter la vitesse du transport maritime et renforce la recherche de la vitesse sur le plan national. De même, le fret aérien connaît un essor relativement important pour le transport des marchandises à très haute valeur ajoutée.

GTKM		2000	Pégase 2050
International			
International IntraEurope	Routier	37	15
	Rail	6	50
	Navigation Intérieure	2	3
	Avion	0,13	11
	Maritime	98	149
International ExtraEurope	Routier	1	4
	Rail	0	2
	Navigation Intérieure	1	4
	Avion	7	23
	Maritime	2388	7884
Total		2540	8145
		H.G. LOPEZ-RUIZ 2009	

Tableau 11 Répartition du trafic international –marchandises

Comme nous l'avons évoqué dans la première partie de la thèse, plus les PIB des pays de l'UE augmentent, 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 prennent de la valeur. Parallèlement, la main-d'œuvre bénéficie d'une hausse de salaire et donc de la valeur du temps qu'elle passe au travail (ce qui rend le temps de transport plus coûteux).

De ce fait, les marchandises et les passagers doivent être transportés de plus en plus rapidement à leur destination finale, en France ou en Europe. Dans le même temps, plus le transport est rapide, plus s'étend la zone de marché par l'augmentation des distances parcourues.

En d'autres termes, si l'observation des vitesses croissantes s'explique parfaitement par le renchérissement des produits transportés et par l'augmentation de la richesse de la population, la hausse de la mobilité s'explique par le fait que le renchérissement du coût du transport à haute vitesse a été moins rapide que le renchérissement du transport au km. Cela implique que, grâce à des vitesses plus élevées dans un temps qui demeure constant depuis au moins vingt ans, le coût du transport rapide n'a pas constitué un obstacle à l'élargissement des zones atteignables.

En reprenant le raisonnement présenté dans le chapitre du module infrastructures, dans TILT, nous considérons que les développements futurs du transport peuvent se comparer aux changements qui seraient introduits dans le système par la construction ou la disparition d'une infrastructure de transport. Ainsi, dans ce scénario, l'apparition ou la disparition d'une telle infrastructure entraîne l'augmentation ou la diminution du temps de transport, aussi bien pour les passagers que pour les marchandises. Aussi, les acteurs (chargeurs logisticiens, transporteurs et individus en général...) intègrent-ils la nouvelle situation en minimisant leurs coûts par la diminution du temps de transport, donc du temps de stockage et d'immobilisation (pour les marchandises), et par la diminution du coût au kilomètre (pour les marchandises et les passagers).

Dans Pégase, par rapport à l'année de base (2000), apparaît une forte croissance des transports de voyageurs, tant pour les trafics régionaux qu'interrégionaux (plus 40%). Les trafics en milieu urbain augmentent 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.

2.2.2 Emissions et politiques publiques

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 associées. Par conséquent, 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.

1000tCO ₂		2000	Pégase 2050	
URBAIN	<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	7050	2336
		- Urbain routier -	7050	2336
	<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	35216	1913
		- VP urbain -	34618	1737
		- TC urbain -	599	176
REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	10651	4345
		- Région routier -	10651	4345
	<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	17898	6215
		- VP région-	16838	6075
		- TC région -	1060	141
INTER-REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	22135	21198
		- Inter-région routier -	21410	19119
		- Inter-région rail -	475	0
		- Inter-région nav. Intérieure -	249	356
		- Inter-région modes rapides -	-	1722
	<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	24752	18460
		- VP inter-région -	18096	6749
		- TC inter-region -	721	50
		- TGV inter-region -	0	0
		- Avion -	5936	11661
TOTAL	<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	39836	27879
		<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO₂ -	77867

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 12 Emissions de CO₂ pour les passagers et les marchandises

Dans les tableaux 12 et 13, 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 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 et sont largement généralisés en 2050. 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.

1000tCO2		2000	Pégase 2050
International			
International IntraEurope	Routier	3941	2224
	Rail	38	0
	Navigation Intérieure	67	222
	Avion	120	15677
	Maritime	978	3229
International ExtraEurope	Routier	142	290
	Rail	3	0
	Navigation Intérieure	47	154
	Avion	2281	5648
	Maritime	13061	43118
Total		20678	70562
		H.G. LOPEZ-RUIZ 2009	

Tableau 13 Emissions pour le trafic international -marchandises-

Le transport aérien représente une partie importante du trafic et des émissions de CO₂ au niveau international. Même si le transport maritime reste le maillon le plus important de la chaîne et même si les marges de manœuvre sont relativement étroites, des recherches sur la baisse de consommation des navires ont été entreprises. Nous pouvons notamment citer les récentes recherches d'une équipe allemande pour mettre en place un porte-conteneur à faible consommation grâce à l'aide d'une voile programmable et dirigeable afin de réduire la consommation en carburant.

En outre, il semble important de rappeler que le rapport d'émission par Tkm existant entre la route et la mer est de presque 20, c'est à dire que 1 Tkm par la route génère presque la même quantité de CO₂ que 20 Tkm par la mer.

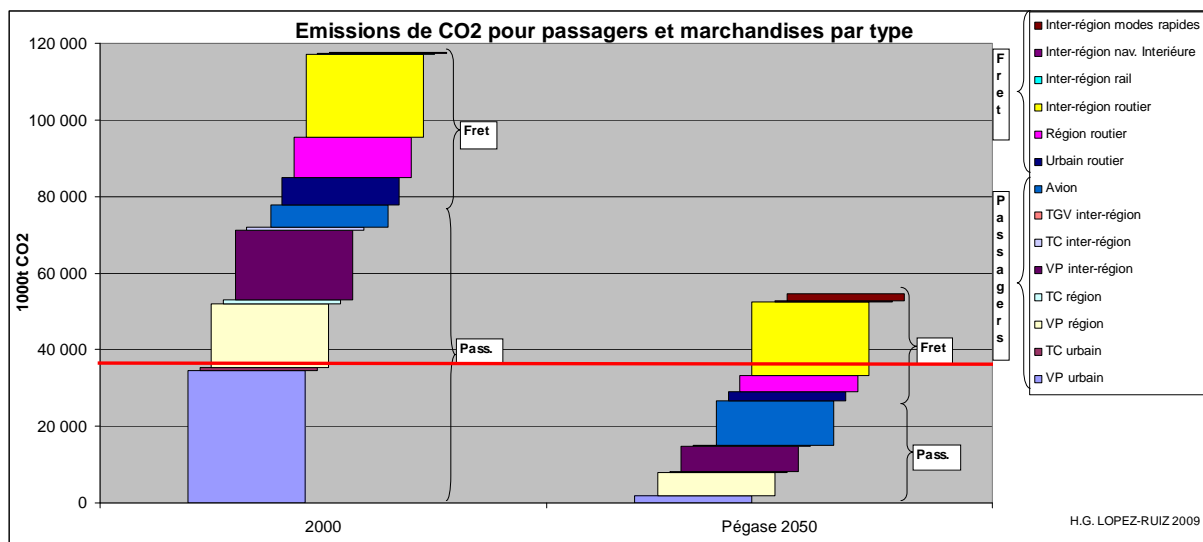


Figure 31 Emissions par type -passagers et marchandises-

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. Ainsi, nous pouvons observer que, en supposant un niveau technologique qui paraît atteignable, nous parvenons à diviser par 2 les émissions. Cela suppose que, en l'absence d'une technologie « 0 émissions », ce qui resterait à réduire en matière des émissions de CO₂, devrait l'être par des transformations dans l'organisation du système des transports.

Ainsi, en 2050, dans Pégase, nous pouvons supposer une situation où toute l'industrie automobile a été contrainte à une réorganisation massive avec l'adoption de la nouvelle propulsion hybride/électrique, dès 2010, date à laquelle, après des perspectives de l'industrie automobile un peu sombres, les nouvelles réglementations ont pu redonner espoir à une concurrence accrue entre les fabricants. Ce scénario s'inscrit dans une tendance où l'explosion d'Internet révolutionne le travail et les habitudes commerciales, en particulier grâce aux technologies qui ouvrent des nouvelles possibilités techniques permettant d'optimiser l'utilisation de toutes les ressources des entreprises et des ménages. La logistique dans l'industrie et les transports ainsi que l'organisation du système apparaissent comme les sources nouvelles et essentielles d'une productivité accrue.

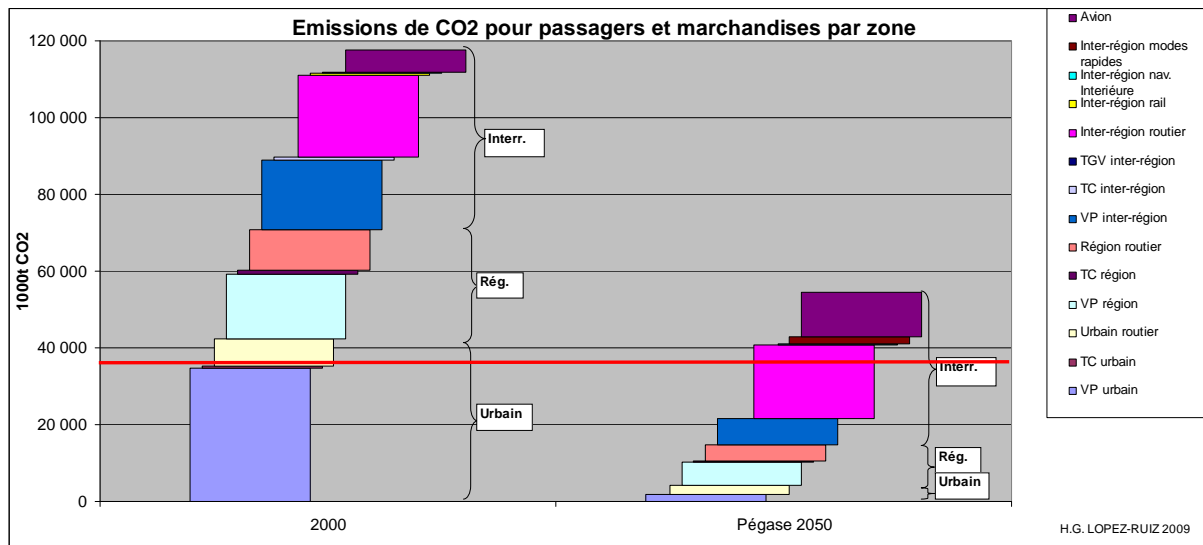


Figure 32 Emissions par zone -passagers et marchandises

Les entreprises de transport de marchandises proposant des services 3PL et 4PL (Third/Fourth Party Logistics) peuvent connaître une forte expansion et la plupart des logisticiens trouvent dans la sous-traitance de la logistique confiée à des transporteurs (qui auraient créé des chaînes logistiques intégrées) un moyen d'optimiser le transport tout en minimisant leurs coûts.

Dans Pégase, de plus en plus de personnes achètent sur Internet mais les achats dans le commerce traditionnel restent toujours importants. Par ailleurs, les produits exotiques sont de plus en plus couramment consommés. D'un point de vue macro-économique, la hausse des coûts des transports routiers provoque un certain effet inflationniste, néanmoins limité par la concurrence des chemins de fer et compensé par un effet déflationniste résultant de la diminution du coût social dû à l'usage du transport routier -notamment les externalités environnementales-, non entièrement couvert par les impôts sur les carburants et les péages. La contribution du secteur des transports au PIB augmente alors que celle des services publics diminue dans des proportions semblables. La demande de transport résultant de l'activité économique est entièrement satisfaite, ce qui signifie qu'aucune rétroaction négative du secteur des transports n'a d'incidence sur l'ensemble de l'économie.

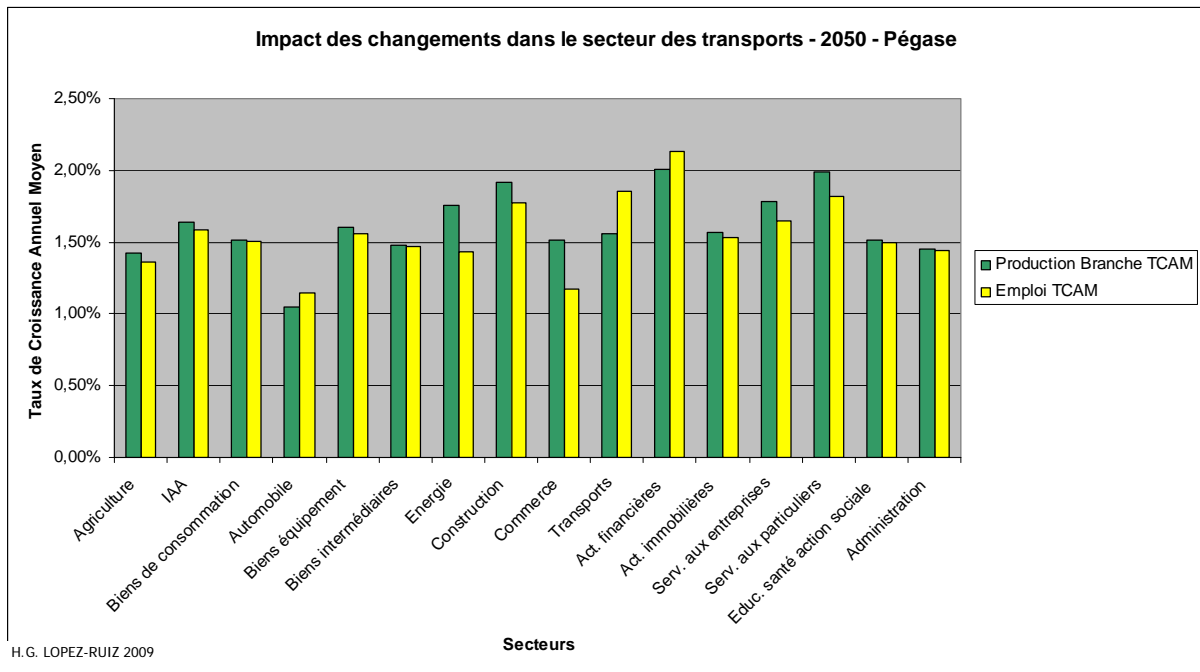


Figure 33 Impact économique par secteur

En outre, si nous conservons la structure des déterminants de la demande de l'année de base et si nous introduisons les éléments de trafic de Pégase, nous observons qu'en raison de l'inélasticité de la demande de la VP, il est nécessaire, pour parvenir au trafic VP souhaité avec une stabilité du budget monétaire de transport :

- d'accepter une augmentation très importante du coût des voitures liée à une baisse significative du coût des transports en commun ;

ou bien

- d'accepter une diminution très importante du niveau de service des infrastructures routières consacrées à la voiture particulière liée à une augmentation très forte du niveau de service des transports en commun.

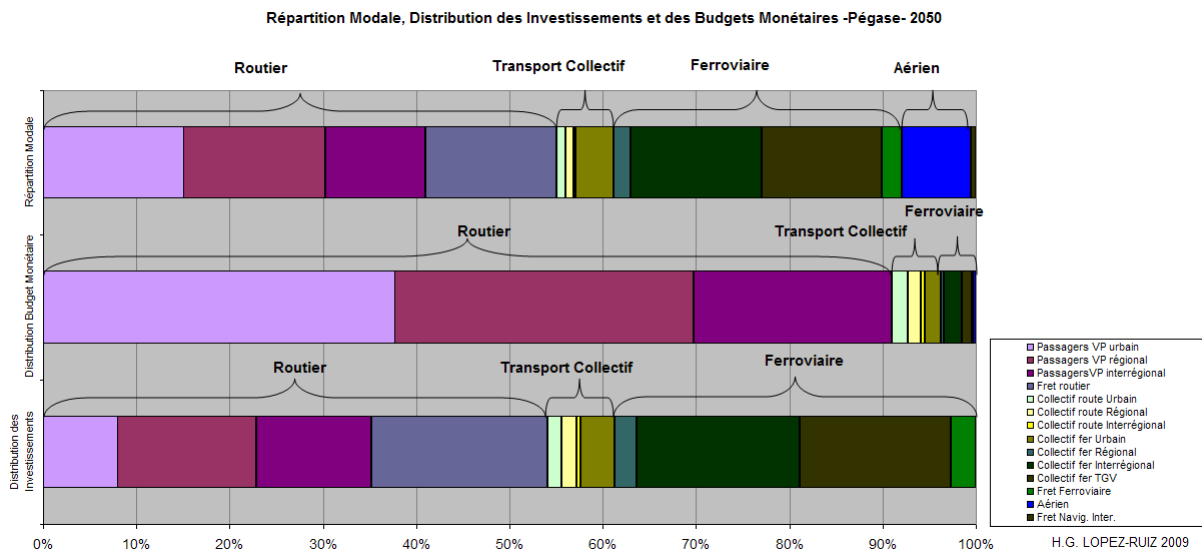


Figure 34 Distribution du budget transport des ménages, répartition modale et besoins en investissement

Comme nous pouvons l’observer dans la figure 33, les investissements en matière d’infrastructures ferroviaires restent un facteur important de la cohérence du scénario Pégase, qui semble s’inscrire dans une logique tendancielle et nous pouvons supposer que l’augmentation des TC est la conséquence d’une forte hausse du coût de la VP couplée à de très fortes améliorations du niveau de service des TC. Par ailleurs, pour que l’avion puisse continuer son développement fulgurant, il faut que le secteur maintienne le niveau actuel de baisse des prix.

Comme nous pouvons le voir dans le graphique précédent, la structure de coûts de l’année de base est cohérente avec une situation où la plupart des dépenses en transport se font sur la voiture en urbain, régional et interrégional. Les PL et VUL électriques entrent sur le marché mais l’utilisation de ces véhicules est intégrée pour pallier les politiques visant la réduction de consommation de pétrole.

Dans Pégase, les technologies doivent assurer la plus grande partie de l’effort de réduction d’émissions. On peut imaginer que les producteurs et les distributeurs affichent le taux de CO₂ dont ils sont responsables afin de montrer qu’ils sont « propres et technologiques ». Ce comportement devient un moyen de communiquer sur la responsabilité sociale et le modernisme des entreprises.

Comme le montre l'analyse multicritère, 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.

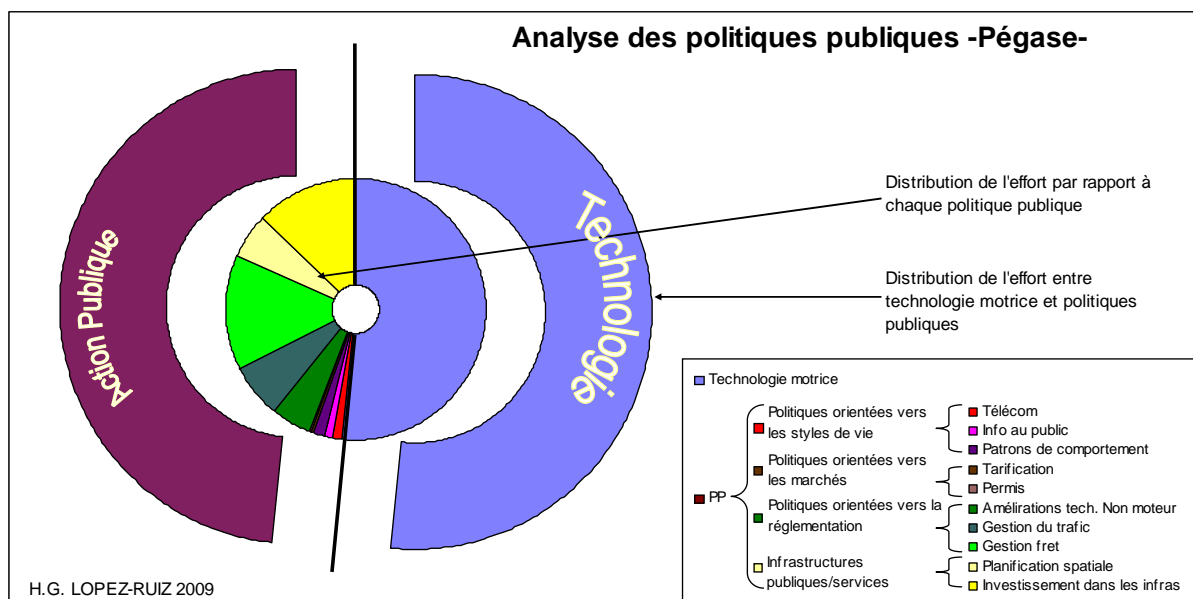


Figure 35 Analyse multicritère du poids des politiques publiques

Dans Pégase, nous observons que 67% des effets sur les émissions qui ne sont pas dues aux technologies motrices (48%) proviennent d'une gestion améliorée des trafics.

Politique Publique	Apport	Apport	Sentier de politiques publiques/Policy package
Télécom	2%		Politiques orientées vers les styles de vie
Information au public	1%		
Patrons de comportement	1%	4%	
Tarification	8%		Politiques orientées vers les marchés
Permis	4%	12%	
Améliorations tech. Non-moteur	27%		Politiques orientées vers la réglementation
Gestion du trafic	22%		
Gestion fret	18%	67%	
Planification spatiale	10%		Infrastructures publiques/services
Investissement dans les infras	7%	17%	

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 14 Poids des politiques publiques et sentier des politiques publiques

Un tel résultat est dû au fait que, même si le coût du transport routier augmente dans ce scénario, l'accroissement de la vitesse qu'il propose a pour conséquence que les agents économiques sont prêts à payer plus pour se déplacer plus rapidement 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, 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 1927 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 Mds€	Modes	2050 Pégase	Per annum	Année 2007
Investissement	Route	1043	21	12
	Fer	747	15	2
	TU+TCNU	137	3	2
	Autres	-	-	1
	Total	1927	39	18
H.G. LOPEZ-RUIZ 2009				

Tableau 15 Besoins en investissement par type d'infrastructure

En ce qui concerne la collecte des marchandises, peu de changements sont envisagés. Elle se fait grâce à l'implantation des centres de collecte situés près des axes de transport. Les nouvelles technologies d'information facilitent grandement le transport et la logistique. Le marché étant de plus en plus conscient du contenu énergétique des produits, producteurs et distributeurs font pression sur les transporteurs pour qu'ils s'efforcent de minimiser le poids environnemental de la collecte de marchandises en innovant sur l'ensemble de la chaîne logistique.

Les centres de collecte sont équipés pour offrir un service multimodal. Une partie croissante des marchandises arrive par rail ou par mode fluvial, et le dernier trajet utilise des véhicules hybrides et électriques. Tout le système est optimisé pour offrir un service sûr et rapide. La distribution continue à se développer dans une logique de massification et une optimisation accrue et est intégrée sur le transport des marchandises à haute valeur ajoutée. Une partie croissante du transport régional et interrégional des marchandises destinées à la distribution est réalisée par rail. Le transport maritime est utilisé en combinaison avec des liaisons ferroviaires et des voies navigables pour réduire les kilométrages en poids-lourds.

Le transport urbain des marchandises et des passagers est prioritairement réalisé par des véhicules électriques. Toutefois, une forte différenciation dans le service du transport est observée du point de vue des véhicules utilisés selon la nature des déplacements et les besoins en matière de service.

Concernant les marchandises, les véhicules électriques, ayant une autonomie de 200 km et une vitesse de pointe de 75 km/h, imposent des ruptures de charges sur la chaîne logistique. De ce fait, les produits frais et périssables sont transportés en utilisant majoritairement des véhicules hybrides, qui permettent d'accomplir le trajet sans rupture de charges.

D'un point de vue sectoriel, le chiffre d'affaires et la valeur ajoutée de l'ensemble du secteur des transports augmentent, avec un transfert des services de transport routier en direction des services de transport ferroviaires.

	Consommation intermédiaire		Production Branche		Emploi	
	TCAM	TC	TCAM	TC	TCAM	TC
Agriculture	1,6%	117,2%	1,4%	102,5%	1,4%	96,8%
IAA	1,7%	129,9%	1,6%	124,6%	1,6%	118,9%
Biens de consommation	1,6%	119,9%	1,5%	111,0%	1,5%	111,0%
Automobile	1,2%	82,7%	1,2%	77,6%	1,2%	84,9%
Biens d'équipement	1,6%	118,4%	1,6%	116,0%	1,5%	113,9%
Biens intermédiaires	1,5%	113,6%	1,5%	107,8%	1,5%	107,2%
Energie	1,5%	107,3%	1,7%	129,4%	1,5%	109,4%
Construction	1,8%	143,6%	1,9%	157,6%	1,8%	140,2%
Commerce	1,5%	113,5%	1,5%	111,0%	1,2%	81,5%
Transports	1,5%	109,9%	1,3%	87,7%	1,7%	129,5%
Act. financières	1,7%	134,6%	1,9%	158,9%	2,0%	167,6%
Act. immobilières	1,6%	125,7%	1,6%	117,5%	1,5%	114,4%
Serv. aux entreprises	1,7%	127,4%	1,8%	138,4%	1,6%	125,7%
Serv. aux particuliers	1,7%	136,9%	2,0%	165,3%	1,8%	144,1%
Educ. santé action sociale	1,6%	117,6%	1,5%	111,3%	1,5%	110,6%
Administration	1,7%	127,5%	1,4%	105,2%	1,4%	105,0%

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 16 Taux de croissance par secteur

De manière générale, Pégase est un scénario dans lequel le secteur automobile subit des contraintes mais connaît toujours une croissance relativement forte. Le secteur des transports en commun, celui du transport ferroviaire et celui du transport marchandises connaissent une croissance située dans la moyenne.

Concernant les échanges interentreprises, la hausse substantielle des coûts au kilomètre des véhicules routiers assurant un service en «juste à temps» rend celui-ci moins attractif économiquement pour les pondéreux et les produits semi-finis. La performance des entreprises ferroviaires est devenue un facteur essentiel de la chaîne logistique dans ce secteur, avec quelques acteurs importants sur le marché proposant des services de transport.

Par conséquent, la valeur en CO₂ par tonne de marchandise ainsi que la vitesse moyenne et le coût sont les valeurs mises en avant par les prestataires de services de transport pour remporter des contrats. Symétriquement, pour les transports de passagers, les offres « tout compris » et intermodales constituent un atout pour une utilisation accrue des modes de déplacement plus respectueux de l'environnement. Les investissements réalisés en matière d'infrastructures ferroviaires amènent le secteur de la construction et celui des activités financières à connaître une croissance au-delà de la moyenne.

Dans Pégase, l'un des principaux facteurs est que le bénéfice des économies d'échelle est toujours plus important que celui des économies de proximité pour les entreprises et les individus, qui par conséquent ne trouvent qu'un intérêt relatif à la proximité ou à la réduction des distances de transport. Dans Pégase, peu de changements interviennent par rapport à la situation actuelle.

Points importants de Pégase

Pégase présente une situation dans laquelle les investissements en matière d'infrastructures sont très importants. De ce fait, deux problématiques émergent comme un point de rupture pour Pégase :

- le financement de ces infrastructures ;
- la demande d'espace lié à la voiture.

Ainsi, même si Pégase connaît une hausse importante dans l'utilisation des TC, celle-ci est accompagnée d'une forte demande en infrastructures en même temps que la source du financement, la taxe sur le CO₂, est réduite à la moitié.

Dans ce cadre, si nous supposons, que dans le même temps, le prix du CO₂ est multiplié par 10, Pégase est un scénario qui aboutit à l'équilibre. Cela dit, étant donné que Pégase est un scénario tendanciel, les incitations pour parvenir à des changements de comportement (notamment en urbain et en longue distance) poussent à une concurrence accrue sur les différentiels de coût entre les TC (y compris le TGV) et les modes privés.

Par conséquent, Pégase est un scénario où il faut planifier des méthodes d'indemnisation pour faire en sorte de ne pas générer des effets négatifs au niveau de l'équité d'accessibilité aux infrastructures des TC.

Chapitre 3 - Scénario Chronos - Favoriser la multimodalité verte

2.3.1 Modélisation du trafic

La logique du scénario Chronos instaure une augmentation du prix réel du transport routier, qui pénalise la vitesse et les émissions de CO₂. Dans la logique de TILT, cette augmentation est semblable à la disparition ou à la tarification d'une infrastructure (suivant la logique inhérente au module « infrastructures » de TILT). La manière dont le modèle est construit amène le système à s'adapter en jouant sur la répartition modale. La route devenant trop coûteuse pour certains types de déplacements, la logique inhérente au système conduit à proposer des améliorations dans le système -voire une diminution du coût généralisé- en utilisant d'autres moyens de transport qui soient moins onéreux, pour un risque de retard qui ne soit pas trop différent de celui proposé par la route. Ainsi, dans Chronos, une logique de construction des solutions de transport intégrées et optimisées ressort comme un besoin. Deux conséquences directes à ce changement peuvent être observées: une réduction des émissions liées au transport routier en faisant participer d'autres modes de transport moins émissifs et une stabilité des dépenses concernant le transport, à la fois dans les budgets de ménage et dans les dépenses logistiques des entreprises mais pas des APU.

L'enjeu du scénario est de parvenir à contrôler le développement du transport routier, qui est à la fois rapide et très émissif de CO₂, en le pénalisant à hauteur de la des acteurs économiques tout en proposant un service plus performant sur les réseaux ferroviaire, fluvial et sur celui des transports en commun. De cette manière, sont obtenus des résultats encourageants pour la longue distance en même temps qu'est favorisé le transport routier là où les nouvelles technologies motrices peuvent proposer des avancées visant à réduire les émissions de manière efficace, dans le transport urbain et régional.

A l'intérieur de ce scénario, nous allons nous intéresser à l'évolution des parts modales qui nous semblent la plus cohérente avec le développement du système de transports, tant du point de vue des volumes de trafics que de la vitesse moyenne de déplacement des marchandises, compte-tenu des contraintes imposées à la vitesse de chaque mode pour chaque service de mobilité.

Les élasticités à l'activité économique utilisées pour la construction quantitative de ce scénario sont identiques à celles retenues dans le scénario Pégase. Cela implique que les contraintes imposées aux vitesses modales et l'accroissement du coût du transport sont insuffisants pour modifier les tendances de fond sur la logique de l'organisation spatiale de la production et de l'habitat. Dans ce scénario, le développement des distances de transport n'est pas remis en question. Les passagers et les marchandises continuent être transportés de plus en plus loin, mais avec une volonté de reporter leur transport sur d'autres modes que la route. Toutefois, ce report modal contraint la planification spatiale à prendre en compte l'utilisation accrue des transports en commun et du mode ferroviaire.

Tout comme pour Pégase, l'idée inhérente au scénario Chronos, qui repose sur la volonté d'agir sur les prix, nous amène à concevoir le développement du système de transport comme semblable à celui d'un territoire dans lequel sont introduites des améliorations (ou des dégradations) de la fluidité du réseau de transport.

Comme nous l'avons présenté dans la section 1.4.1, ces améliorations ou dégradations de la fluidité sont intégrées par les acteurs économiques tout en minimisant leurs coûts et en maximisant leurs profits. Cette intégration peut se faire grâce à:

- une intégration des changements par le système par augmentation des vitesses du réseau;
- une intégration des changements par le système par augmentation du temps de transport;
- une augmentation de la disposition à payer ;
- une diminution des VKM.

Alors que, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, Pégase s'adapte aux nouvelles contraintes à travers la construction des infrastructures nécessaires pour le maintien d'un temps de transport stable, Chronos le fait par l'augmentation de la durée du temps de transport.

En effet, si nous supposons une élasticité vitesse/PIB=0, avec les mêmes hypothèses que pour le scénario de base du CGPC, nous nous retrouvons dans une situation identique à celle évoquée plus haut : en cas de changement dans le coût de transport, soit le temps de transport doit être accru, soit les distances doivent être réduites. Dans la logique du scénario Chronos, est acceptée une compensation par le temps de transport.

Chronos repose sur l'augmentation relative des prix du transport, notamment routier, (cf. les projets de péage en France) et sur le durcissement des politiques publiques visant la réduction des vitesses. De ce fait, les tendances dans l'évolution du transport peuvent générer des contre-tendances plus respectueuses de l'environnement avec, par exemple, le développement de VUL et de VP plus petites et plus propres et avec la poursuite de la massification des passagers et marchandises (davantage de TC, et des envois encore plus optimisés). De ce fait, il est également possible d'imaginer une augmentation du poids maximum des véhicules lourds et le développement d'axes réservés aux poids lourds et TC.

Caracteristiques			Pégase	Chronos	
ROUTIER		2000	2050	2050	
Marchandises	<i>Km/h</i>				
	<i>Routier national</i>	50	60	52	
	<i>Routier international</i>	-	50	52	
	Passagers	<i>Km/h</i>			
		- VP urbain -	23	30	25
- TC urbain -		20	24	20	
RAIL					
Marchandises	<i>Km/h</i>				
	<i>Rail national</i>	40	40	40	
	<i>Rail International</i>	-	40	40	
Passagers	<i>Km/h</i>				
	- VP région-	58	67	58	
	- TC région -	58	68	57	
MODES RAPIDES					
Marchandises	<i>Km/h</i>				
	<i>Rail+Avion national</i>	40	63	45	
	<i>Rail+Avion international</i>	-	70	70	
Passagers	<i>Km/h</i>				
	- VP inter-région -	110	115	90	
	- TC inter-région -	80	90	80	
	- TGV inter-région -	250	250	250	
	- Avion -	500	500	500	
TOTAL					
Marchandises (nat/inter)	<i>Km/h</i>	43	54/52	43/52	
Passagers	<i>Km/h</i>	45	50	37	
Elasticités					
Vitesse/PIB		-	0,33	0	
T.Km/GDP Intérieur		-	0,6	0,6	
T.Km/Commerce Internat.		-	1,6	1,6	
Macroéconomie					
Population		64	67	67	
Taux de croissance du PIB			1,5	1,5	
Enfants par foyer		2,19	2,15	2,15	
Indice de productivité		100	225	225	
BTT		1	1	1,2	

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 17 Hypothèses du scénario

Dans le scénario Chronos, nous considérons que l'élasticité vitesse/PIB est égale à 0 par hypothèse sur l'ensemble du territoire métropolitain. La vitesse moyenne de déplacement des marchandises est ainsi stabilisée jusqu'en 2050 à 43 km/h et à 37 km/h pour les passagers. La stabilité à long terme de la vitesse moyenne est compatible avec une multiplicité de combinaisons possibles entre les vitesses unitaires par mode et le poids de chaque mode dans le trafic total. Nous avons choisi une combinaison cohérente avec l'esprit du scénario Chronos, à savoir un contrôle strict de la croissance de la vitesse sur la route compensé par une offre soutenue de transport ferroviaire rapide performant. En considérant ainsi que la

croissance de la vitesse moyenne sur la route est limitée pour les marchandises et pour les passagers, la vitesse moyenne du rail conventionnel et des modes rapides doit augmenter d'ici 2050 pour conserver un système cohérent avec une vitesse moyenne de déplacement constante pour les marchandises et en légère baisse pour les passagers.

Cette évolution n'est envisageable qu'au prix d'un développement significatif des modes rapides (ferroviaire rapide et aérien). Il est toutefois important de remarquer que la pénalisation globale de la vitesse joue également sur les besoins en matière de modes rapides pour équilibrer le système. En d'autres termes, les besoins en infrastructure ferroviaire rapide ainsi que les besoins en matière de transport aérien de marchandises sont moindres que dans le scénario Pégase.

Le contrôle strict de la vitesse moyenne sur route suppose par ailleurs un renforcement du poids des services de transport en commun en urbain et régional et, parallèlement, une importance accrue du transport ferroviaire sur la longue distance. Cela suppose une amélioration relative des services du système ferroviaire et des TC par rapport à la route, susceptible de renforcer l'attractivité de ce mode sur la longue distance.

Dans Chronos, nous envisageons donc un système intégré qui puisse offrir des solutions d'accessibilité performantes et des chaînes logistiques porte-à-porte avec une large utilisation des TC, des ports et du rail.

GTKM/GPKM		2000	Pégase 2050	Chronos 2050
URBAIN	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	39	62
		- Urbain routier -	39	62
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	283	373
		- VP urbain -	263	279
		- TC urbain -	20	94
REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	34	54
		- Région routier -	34	54
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	192	378
		- VP région-	173	284
		- TC région -	20	94
INTER-REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	254	408
		- Inter-région routier -	197	288
		- Inter-région rail -	50	59
		- Inter-région nav. Intérieure -	7	10
		- Inter-région modes rapides -	-	51
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	363	639
		- VP inter-région -	280	200
		- TC inter-région -	22	32
		- TGV inter-région -	33	177
		- Avion -	29	230
TOTAL	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	327	525
		<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	838

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 18 Répartition du trafic passagers et marchandises

Le graphe ci-dessous montre qu'une partie importante du trafic routier bascule sur le ferroviaire dans le scénario Chronos. La pénalisation de la vitesse et des émissions de CO₂ rendent le transport ferroviaire de plus en plus attractif, et nous pouvons donc observer que, entre l'année de base et 2050, il y a un report modal très important vers le ferroviaire conventionnel -notamment pour les marchandises- et vers les modes rapides. Ce report sert de soupape pour que le système puisse connaître un trafic quasi stable mais tout en tenant compte d'une légère baisse sur les trajets régionaux et interrégionaux. C'est la légère amélioration des vitesses ferroviaires et des TC conjuguée à une hausse du coût de la route qui régissent la logique de Chronos.

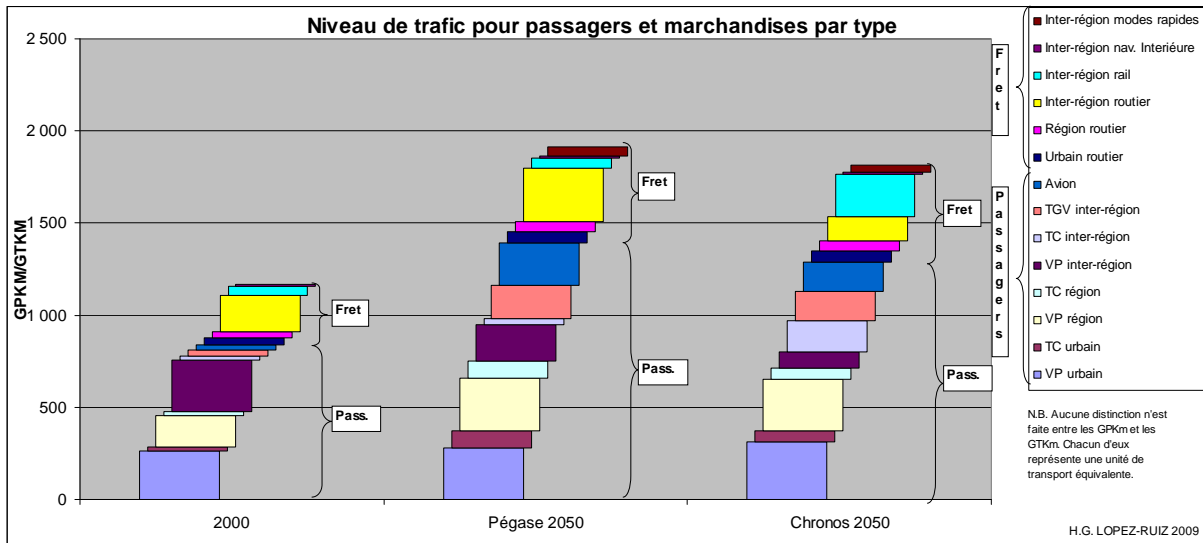


Figure 36 Trafic par type -passagers et marchandises

Pour la partie internationale de ce scénario, nous prenons en considération l'ouverture de nouvelles routes maritimes, avec des passages plus rapides permettant de saturer les besoins en vitesse et de les coupler à un système intérieur qui pénalise le transport routier mais développe fortement ces performances sur le rail et sur la navigation intérieure.

GTKM		2000	Pégase 2050	Chronos 2050
International				
International IntraEurope				
	Routier	37	15	15
	Rail	6	50	50
	Navigation Intérieure	2	3	3
	Avion	0,13	11	11
	Maritime	98	149	149
International ExtraEurope				
	Routier	1	4	4
	Rail	0	2	2
	Navigation Intérieure	1	4	4
	Avion	7	23	23
	Maritime	2388	7884	7884
Total		2540	8145	8145

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 19 Répartition du trafic international –marchandises

Comme pour le scénario Pégase, les services de transport de marchandises en urbain et en régional sont censés être assurés entièrement par la route. Du point de vue du trafic international, nous sommes dans une logique semblable au scénario « Régulation par l'économie » du rapport *Prospective Fret2030*.

Dans le scénario Chronos, même s'il existe une logique de pénalisation de la vitesse sur le plan national, sur le plan international, les besoins en vitesse sont toujours croissants. A ce niveau, nous retrouvons un système ferroviaire qui répond de mieux en mieux aux attentes des logisticiens, ce qui amène une partie grandissante du trafic international à être acheminée par le rail ou par la voie maritime.

Dans Chronos, pour les passagers, domine une logique où une hausse du prix de l'utilisation de la voiture entraînera une augmentation de l'usage des transports en commun. Ce glissement vers les transports en commun modifiera le budget des ménages, qui sont censés réinvestir les gains issus des économies engendrés par le passage à un mode de déplacement relativement moins cher. Cet effet présente un paradoxe car une partie pourra être réinvestie en relocalisation (pour s'approcher des infrastructures de transports en commun) et une autre réinvestie en services de transport en longue distance, notamment l'avion.

Pour les marchandises, la logique est relativement semblable, en raison des politiques publiques cherchant à pénaliser la vitesse routière. Une amorce de changement est obtenue 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 trouver une solution qui minimise les coûts. L'enjeu, dans Chronos, est un arbitrage entre le besoin en vitesse (qui augmente) et les contraintes publiques sur la vitesse (qui l'amènent à rester constante), conduisant à utiliser des modes de transport plus propres et à diminuer l'empreinte en CO₂ de l'ensemble du transport de marchandises.

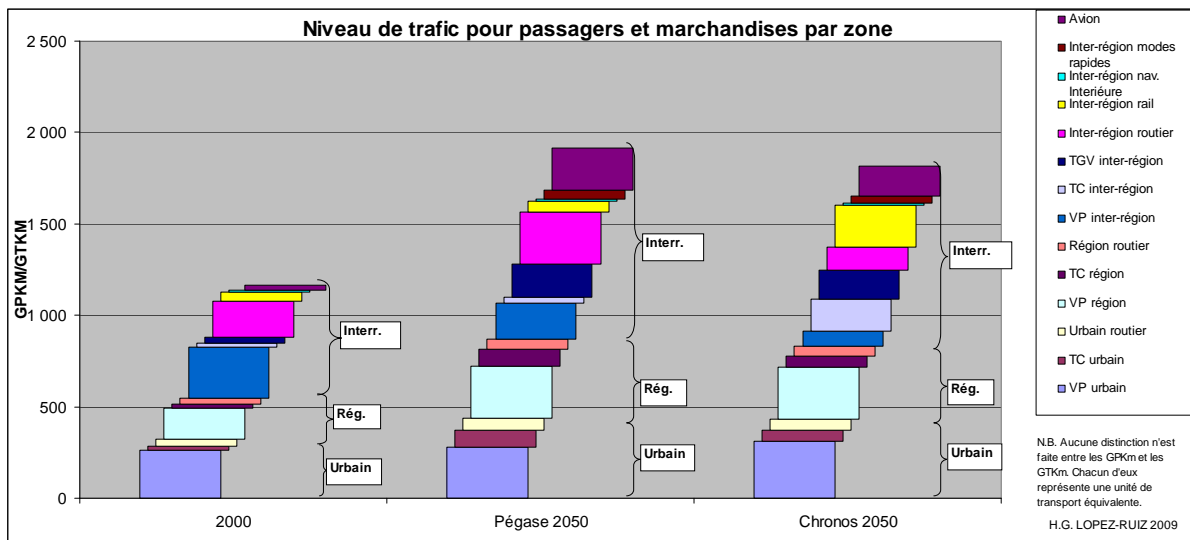


Figure 37 Trafic par zone -passagers et marchandises-

Par conséquent l'objectif est d'acheminer un certain nombre de tonnes par le rail tout en maintenant constante la vitesse globale de déplacement des marchandises, ce qui conduit à une croissance accélérée du rail alors que la vitesse sur la route stagne.

Les tonnes et les passagers 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-là d'un point central à souligner. Dans ce type de scénario, d'importants investissements sont nécessaires pour développer le transport ferroviaire, et des bouleversements profonds sont également nécessaires dans l'organisation du secteur.

En conséquence, dans Chronos, grâce à l'accroissement de la vitesse moyenne sur le rail, la logique de l'accroissement des distances de transport peut être maintenue. Cet accroissement des distances moyennes de parcours est au cœur du développement du rail. Non seulement le transport par rail est de plus en plus rapide par rapport au transport par route, mais cette tendance se renforce également avec l'accroissement des distances moyennes (le rail étant un mode très rentable sur longue distance.)

2.3.2 Emissions et politiques publiques

Sur la base des trafics prévisionnels en 2050, les émissions de CO₂ sont estimées et présentées dans les figures suivantes. Il est à noter que les technologies sont ici les mêmes que dans le scénario Pégase 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 la poursuite du développement du transport aérien.

1000tCO2		2000	Pégase 2050	Chronos 2050
URBAIN				
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	7050	2336	2711
	- Urbain routier -	7050	2336	2711
<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	35216	1913	2042
	- VP urbain -	34618	1737	1930
	- TC urbain -	599	176	113
REGION				
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	10651	4345	4716
	- Région routier -	10651	4345	4716
<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	17898	6215	6215
	- VP région -	16838	6075	6075
	- TC région -	1060	141	141
INTER-REGION				
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	22135	21198	10139
	- Inter-région routier -	21410	19119	8508
	- Inter-région rail -	475	0	0
	- Inter-région nav. Intérieure -	249	356	356
	- Inter-région modes rapides -	-	1722	1275
<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	24752	18460	10625
	- VP inter-région -	18096	6749	2210
	- IC inter-region -	721	50	269
	- TGV inter-region -	0	0	0
	- Avion -	5936	11661	8146
TOTAL				
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	39836	27879	17566
	- TOTAL 1000tCO2 -	77867	26589	18883
<i>Passagers</i>				

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 20 Emissions de CO₂ pour les passagers et les marchandises

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 permet au mieux d'espérer un facteur 3. Il

est donc nécessaire d'envisager une autre famille de scénarios, accordant plus de place à la proximité (*cf.* Hestia).

Du point de vue du trafic international, nous avons les mêmes émissions que dans Pégase car les hypothèses n'ont pas changé sur les trafics européens et extra-européens.

1000tCO2		2000	Pégase 2050	Chronos 2050
International				
International IntraEurope	Routier	3941	2224	2224
	Rail	38	0	0
	Navigation Intérieure	67	222	222
	Avion	120	15677	15677
	Maritime	978	3229	3229
International ExtraEurope	Routier	142	290	290
	Rail	3	0	0
	Navigation Intérieure	47	154	154
	Avion	2281	5648	5648
	Maritime	13061	43118	43118
Total		20678	70562	70562

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 21 Emissions pour le trafic international -marchandises-

L'enjeu, dans le scénario Chronos, est de jouer sur l'offre du rail, qui devrait être de plus en plus attrayante, -avec des accessibilités améliorées, des chaînes logistiques intégrées et peu de ruptures de charges- afin de contrer (dans une certaine mesure) l'attractivité du transport aérien.

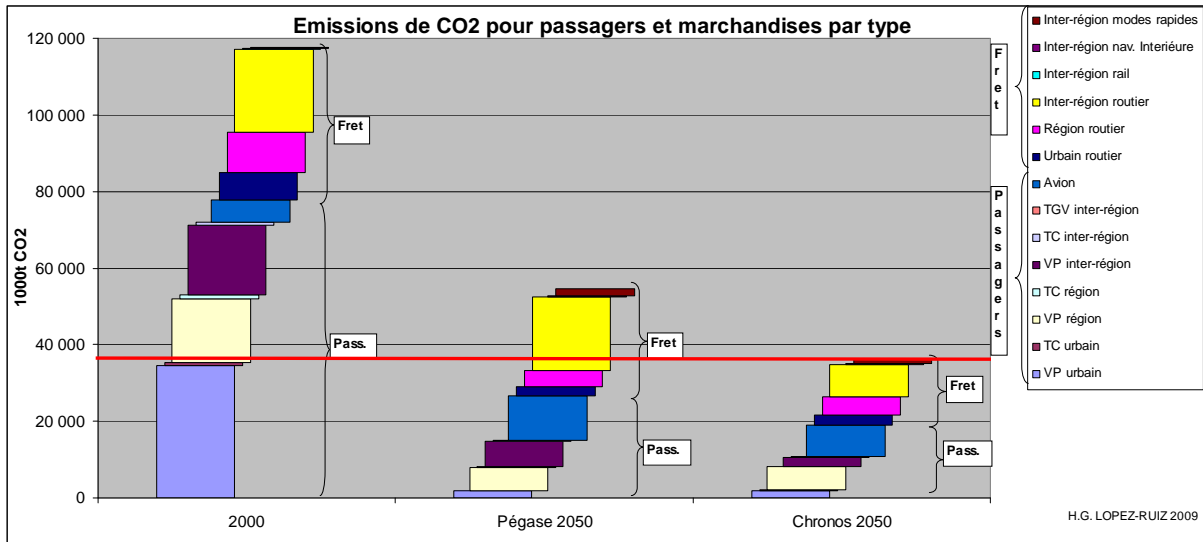


Figure 38 Emissions par type -passagers et marchandises-

Du point de vue du transport des marchandises, l'arbitrage entre le transport maritime et le transport aérien jouera de façon spectaculaire sur l'utilisation du rail. Cela explique l'importance des chaînes logistiques intégrées.

Chronos est un scénario dans lequel la vitesse est pénalisée. De ce fait, nous observons, comme cela se produit au Royaume-Uni, une augmentation du taux moyen de remplissage des véhicules et/ou un report modal sur des modes moins onéreux. Cet effet a une influence positive sur la réduction d'émissions CO₂.

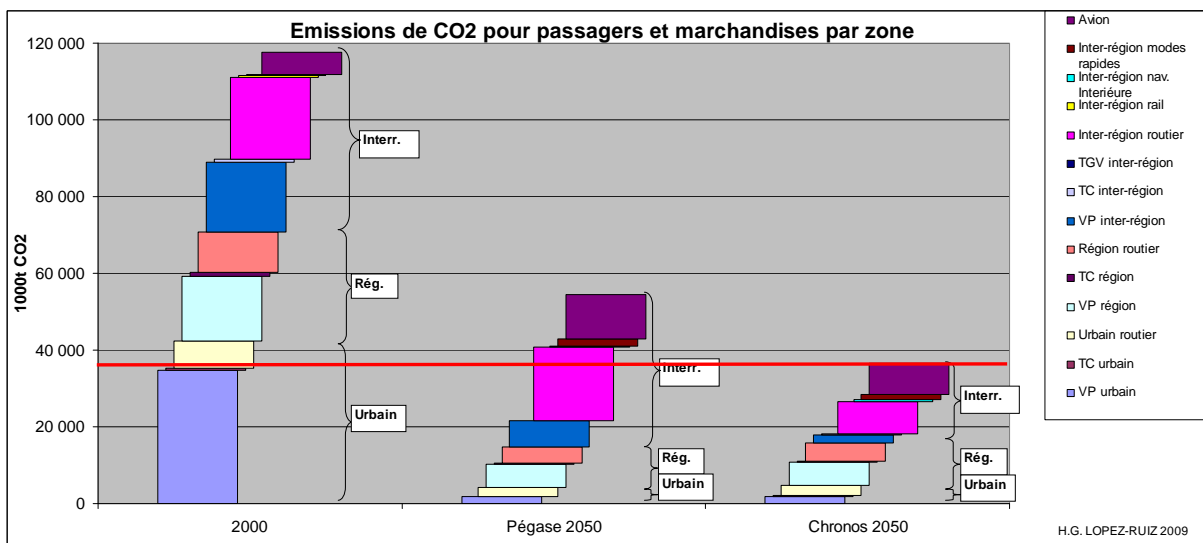


Figure 39 Emissions par zone -passagers et marchandises-

Au total, dans Chronos nous observons une augmentation du coût du transport par route qui est cohérente avec les valeurs préconisées par les autorités publiques pour la contribution climat et énergie (350 euros environ en 2050 pour chaque tonne de CO₂ émise.)

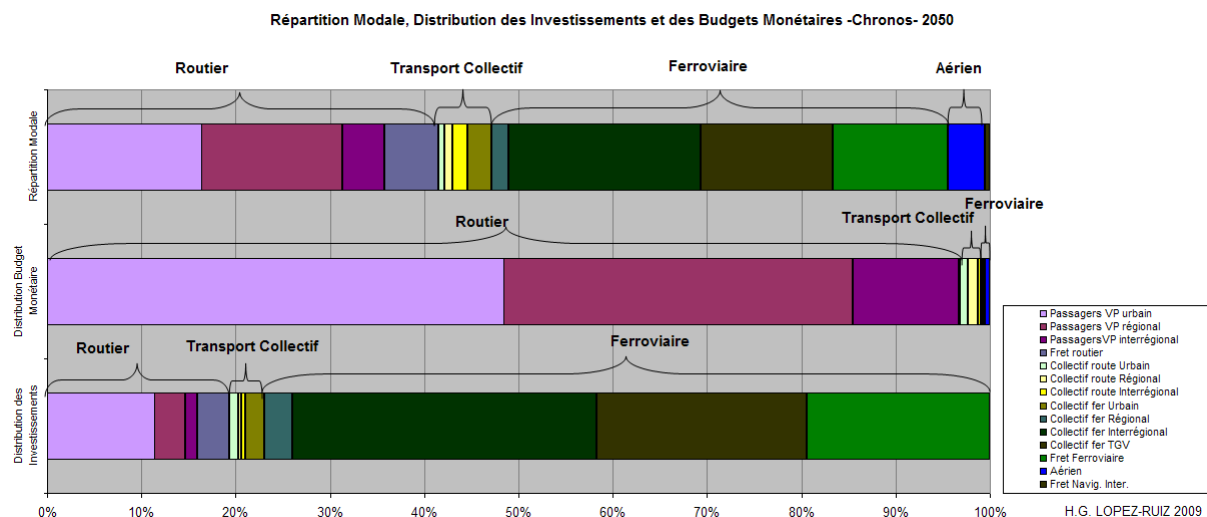


Figure 40 Distribution du budget transport des ménages, répartition modale et besoins en investissement

Chronos suppose que les passagers acceptent des temps de transport plus longs pour pénaliser la vitesse. Cela implique par conséquent qu’une partie importante des transports se fasse par la route (un peu plus de 40% de l’ensemble du trafic). 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.

Ainsi, une double logique d’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 du budget monétaire de transport (qui apparaît comme étant, historiquement, très stable,

autour de 15%), soit accepter une forte hausse des apports des APU (récupérés à partir de la contribution climat et énergie).

En revanche, si l'on suppose la constance du budget du transport, il faut accepter un changement dans la structure du marché - et donc des déterminants de la demande microéconomique - vers une logique de développement de la rentabilité du temps dans les transports, qui suppose un développement fort de nouvelles technologies d'information).

Ainsi, pour que ce scénario soit viable du point de vue d'un équilibre entre la structure macroéconomique et la structure 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'Etat sous forme d'impôts et de péages accrus.

Globalement, les coûts de transport HT restent les mêmes dans Chronos que dans Pégase, notamment à cause de la hausse de la productivité, obtenue grâce à une hausse de l'efficacité logistique et à une utilisation accrue du ferroviaire et de la voie d'eau, qui ont des coûts plus bas que le route.

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 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 ré-augmentation des distances parcourues. Ainsi, 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.

En Mds€	Modes	2050 Pégase	Per annum	2050 Chronos	Per annum	Année 2007
Investissement	Route	1043	21	384	8	12
	Fer	747	15	1529	31	2
	TU+TCNU	137	3	74	1	2
	Autres	-	-	-	-	1
	Total		1927	39	1987	40

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 22 Besoins en investissement par type d'infrastructure

Ainsi, on voit que le sentier des politiques publiques dans Chronos privilégie fortement les solutions de la tarification et de la gestion de trafic, mais il ne faut pas oublier que ce genre de politiques génère un fort besoin en matière de planification spatiale.

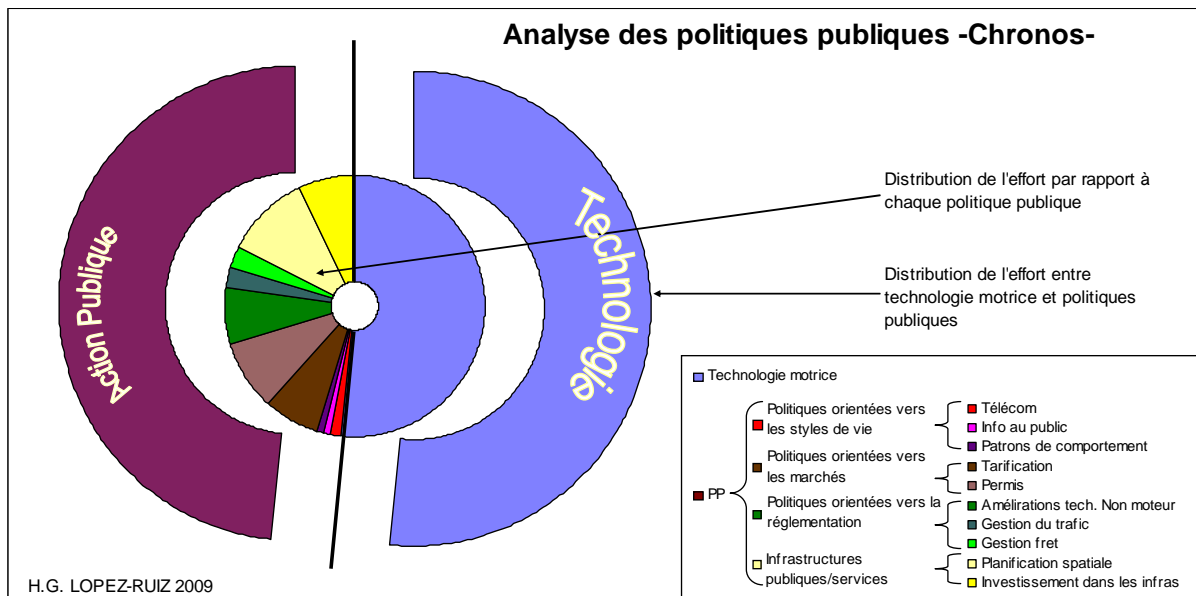


Figure 41 Analyse multicritère du poids des politiques publiques

De cette manière, Chronos suppose que de grands investissements soient effectués, non seulement en matière des infrastructures mais aussi en matière de technologies d'information aux usagers et aux transporteurs. Des équipements de systèmes d'information intelligents en vue d'optimiser les chaînes de transport voient le jour (pour les passagers et les marchandises). Ce scénario suppose que la révolution de la nouvelle technologie du transport combiné soit permise grâce à la nouvelle taxe sur le CO₂ et à la réorganisation des transports en France et en Europe.

Politique Publique	Apport	Apport	Sentier de politiques publiques/Policy package
Télécom	3%		Politiques orientées vers les styles de vie
Information au public	2%		
Patrons de comportement	2%	7%	
Tarifification	14%		Politiques orientées vers les marchés
Permis	18%	32%	
Améliorations tech. Non-moteur	15%		Politiques orientées vers la réglementation
Gestion du trafic	5%		
Gestion fret	5%	25%	
Planification spatiale	22%		Infrastructures publiques/services
Investissement dans les infras	14%	36%	

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 23 Poids des politiques publiques et sentier des politiques publiques

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.

La généralisation de l'utilisation des véhicules électriques et hybrides en urbain est accompagnée d'un essor des producteurs de batteries, qui s'efforcent de construire des batteries moins lourdes, possédant une autonomie accrue. Cette recherche est destinée à construire des véhicules qui puissent concurrencer au niveau régional et interrégional les véhicules hybrides et le ferroviaire.

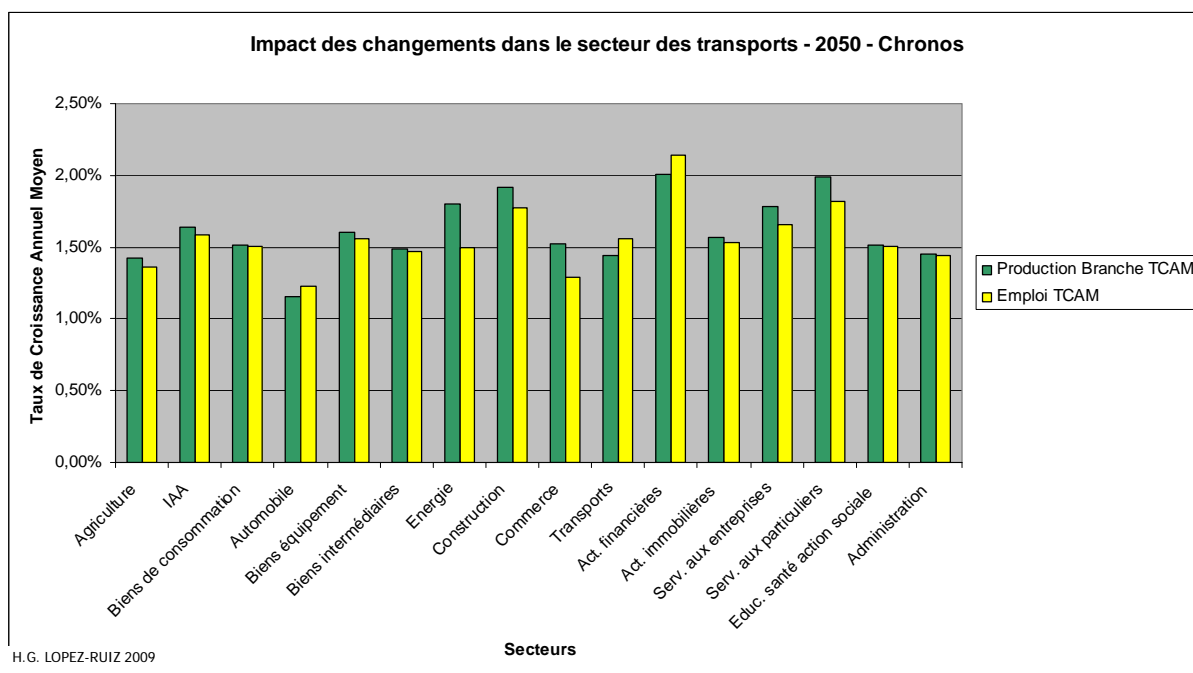


Figure 42 Impact économique par secteur

Par conséquent, avec Chronos, on peut assister à la naissance d'une nouvelle gamme de technologies motrices soutenues par des subventions plus importantes qu'avec Pégase.

Le « Réseau Trans-Européen de Transport Ferroviaire de Fret » est créé. Il vise à mettre en place un réseau de chemins de fer consacré exclusivement au transport transeuropéen de fret. Il est entièrement financé par les taxes CO₂ prélevées sur les carburants moteurs.

Comme la baisse des vitesses pousse à la hausse le coût généralisé du transport, les acteurs économiques répondent à cette hausse en augmentant la productivité et en se reportant sur des transports moins coûteux.

Dans ce cadre, le système de collecte des marchandises est redessiné afin d'offrir les valeurs les plus basses possibles en consommation de carburants fossiles, afin de réduire le poids des taxes liées à l'émission de CO₂. Les distributeurs s'associent aux producteurs et aux transporteurs pour bâtir une logistique fiable, économe du point de vue environnemental et du coût de transport et multimodal. Le système de collecte est l'un des éléments-clés pour cette association. Des nouveaux centres de collecte multimodaux voient le jour afin de rendre plus

efficace l'utilisation de véhicules hybrides. Pour jouir pleinement des avantages des centres de collecte multimodaux, les grands groupes font appel de plus en plus fréquemment à des chaînes de transport intégrées pour optimiser les livraisons ainsi que leurs collectes afin de réduire les émissions liées au transport de leur marchandise.

Un report important de la route vers le ferroviaire à l'échelle régionale et interrégionale se produit en réponse à la hausse du coût du transport. Les vitesses étant contraintes, le transport ferroviaire ainsi que le transport par voie d'eau permettent de faire face au coût croissant de stockage. La gestion des transports massifiés devient une partie très importante de la logistique. Une grande partie des produits à haute valeur ajoutée continue d'être transportée par la route.

De manière générale, dans Chronos, sur l'échelle régionale et urbaine, le nombre de Vkm routiers continue à augmenter de manière importante car la taille réduite des PL, des VUL et des VP -due en partie à une réduction de la carrosserie et en partie à la place à bord que prennent les batteries-, ainsi que leurs contraintes en autonomie, obligent à faire circuler un plus grand nombre de véhicules. Cette hausse de Vkm sur des véhicules moins polluants mais dont la taille est inférieure à celle d'aujourd'hui peut permettre d'éviter d'acquitter des taxes lourdes liées à l'émission de CO₂.

	Consommation intermédiaire		Production Branche		Emploi	
	TCAM	TC	TCAM	TC	TCAM	TC
Agriculture	1,6%	117,9%	1,4%	102,5%	1,4%	96,8%
IAA	1,7%	131,6%	1,6%	125,3%	1,6%	119,2%
Biens de consommation	1,6%	121,5%	1,5%	111,8%	1,5%	111,3%
Automobile	1,2%	83,5%	1,2%	77,3%	1,2%	83,9%
Biens d'équipement	1,6%	123,5%	1,6%	121,5%	1,6%	116,7%
Biens intermédiaires	1,5%	115,3%	1,5%	108,9%	1,5%	107,8%
Energie	1,6%	117,4%	1,8%	143,9%	1,5%	110,3%
Construction	1,8%	145,7%	1,9%	158,7%	1,8%	140,9%
Commerce	1,6%	117,3%	1,5%	112,6%	1,3%	89,9%
Transports	1,6%	119,7%	1,4%	104,7%	1,6%	116,5%
Act. financières	1,8%	140,0%	2,0%	170,3%	2,1%	187,9%
Act. immobilières	1,7%	128,6%	1,6%	118,2%	1,5%	114,3%
Serv. aux entreprises	1,7%	131,0%	1,8%	142,2%	1,7%	127,0%
Serv. aux particuliers	1,8%	139,5%	2,0%	167,7%	1,8%	145,8%
Educ. santé action sociale	1,6%	120,7%	1,5%	111,9%	1,5%	110,6%
Administration	1,7%	130,9%	1,4%	105,3%	1,4%	105,1%

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 24 Taux de croissance par secteur

Le « juste à temps » reste le mode dominant de gestion. Néanmoins, le temps de transport des marchandises est de plus en plus élevé, ce qui conduit à repenser le stockage. Le 3PL et 4PL deviennent de plus en plus la norme. Des grandes entreprises proposent des chaînes logistiques intégrées pour assurer le transport des pondéreux et des produits semi-finis au moindre coût environnemental (et donc monétaire).

Les freins à la vitesse sont intégrés par le système logistique qui répond à cette contrainte en privilégiant le transport par voie ferrée et maritime. Le coût monétaire de ces deux modes par rapport à la route permet d'absorber les hausses du coût général de transport.

Chez les logisticiens, la pratique de la massification devient la norme, et les dépôts communs se généralisent. Le transport des marchandises suit une logique logistique de maximisation des tonnes livrées avec une minimisation des distances routières, sous contrainte de l'autonomie des véhicules.

Avec Chronos, le fait que les changements s'opèrent par le biais du temps de transport se traduit par une dégradation des vitesses sur le réseau, notamment sur le réseau VP. Cette dégradation demande que le réseau ferroviaire soit plus performant et offre une plus grande capacité d'accueil et de volume afin de pouvoir être adapté à la demande. De manière générale, le calage de ce scénario porte plutôt sur l'optimisation des infrastructures que sur le coût. Avec Chronos, les besoins en matière de transport continuent à croître en même temps que les politiques publiques cherchent à faire basculer certains trafics vers le rail en jouant sur les vitesses. Cela implique que le système actuel doive s'adapter en offrant un plus grand nombre d'infrastructures optimisées, même si les plus réticents persistent à utiliser la route.

Points importants de Chronos

Chronos présente une situation qui connaît une très forte croissance des TC et relâche la contrainte sur la concurrence au niveau du coût du transport pour la porter sur l'efficacité et la performance des modes. Dans ce sens, les besoins en matière d'investissement des infrastructures de TC sont élevés.

En outre, même si Chronos connaît une diminution importante de l'utilisation de la voiture, celle-ci reste élevée et soulève la question de la part que prennent les dépenses en VP dans le budget des ménages. Le chiffrage réalisé (sous hypothèse d'une stabilité dans les déterminants de la demande) indique que, dans Chronos, les personnes doivent accepter une augmentation de leur budget monétaire de transport (qui est pourtant stable depuis plusieurs décennies).

En outre, même si la concurrence entre modes est établie largement sur la base des performances, une partie l'est sur la base du coût. Ainsi, l'augmentation de la part du transport dans le budget des ménages pèse sur les coûts acceptables en matière de TC.

De ce fait, Chronos se présente comme un scénario où sont atteintes les limites budgétaires à la fois dans les investissements en infrastructures et au niveau des budgets des ménages. De cette manière, Chronos ouvre la porte à des politiques cherchant à favoriser des arbitrages qui se font sur d'autres déterminants du transport.

Chapitre 4 - Scénario Hestia - Favoriser le découplage absolu

2.4.1 Modélisation du trafic

Le scénario Hestia introduit la notion d'un système possédant des services de proximité. Alors que, dans Pégase et dans Chronos, les distances parcourues connaissent une augmentation tendancielle, dans Hestia elles connaissent une augmentation modérée et différenciée selon l'aire de service. Les distances parcourues en urbain et en régional augmentent plus vite que les distances parcourues en interrégional avec, au total, un nombre de tonnes et passagers kilomètres qui continue de augmenter.

Avec Hestia, nous retrouvons un effet cumulé des politiques sur les vitesses et sur les coûts qui entraînent une diminution du transport routier au profit d'autres modes. De même, ce scénario présente une vision d'organisation polycentrique avec un service de transport multimodal assez performant et particulièrement adapté pour expliquer les effets de la métropolisation.

La logique d'Hestia suppose, par rapport à Chronos, une stabilité de l'élasticité de la mobilité par rapport au PIB en urbain et régional et une légère baisse pour les marchandises afin de conserver la logique d'une densification du centre cohérente avec une réduction des kilométrages moyens. Hestia envisage une diminution générale de l'élasticité TKm/PIB et PKm/PIB par rapport à la tendance, en lien avec l'importance relative du transport interrégional dans le système de transport, car la déconcentration spatiale est hautement liée à une rupture du lien transport/PIB.

La différenciation des valeurs d'élasticité au PIB caractérise un système dans lequel une certaine préférence se manifeste pour la réduction des distances. Dans l'organisation de celui-ci, nous retrouvons une notion d'espace polycentrique fonctionnel. Habitat, travail, production, distribution et collecte sont organisés autour des points de population denses, ce qui se traduit par une diminution des distances en urbain et en régional par rapport à la

tendance, mais ne diminuent pas autant que sur la longue distance. De même, les déplacements de la population s'effectuent dans un bassin d'emploi et de vie avec des services de proximité. Dans ce scénario, les distances en urbain et en régional suivent un double mouvement : d'une part elles se contractent du fait du rapprochement mais, d'autre part, la multiplication des livraisons et des déplacements à l'intérieur des régions-métropoles - du fait du développement de centres denses- oblige à conserver un kilométrage total élevé.

Cette optique est cohérente avec une incitation à ce que les acteurs économiques s'adaptent à une nouvelle situation en réduisant les distances parcourues nécessaires au bon fonctionnement du système. Le scénario Hestia ne suppose pas l'exclusion des transports à longue distance mais une organisation différente du système afin de minimiser les distances parcourues sans compromettre la variété ni la quantité des déplacements liés aux modes de vie et à la consommation.

Ce scénario reflète la reconfiguration de l'espace et des localisations afin de concilier le processus continu d'internationalisation avec une plus grande concentration des bassins de vie et de consommation. Dans ce cadre, la distance au sein même des métropoles exige l'accroissement des communications et des déplacements qui seront rendus encore plus difficiles par les phénomènes de saturation des réseaux. Ainsi, tout repose sur l'habileté des planificateurs à gérer la taille des métropoles en les décomposant en sous-ensembles urbains possédant suffisamment d'autonomie fonctionnelle et sociale afin d'éviter que les distances dans la métropole ne deviennent un problème insoluble.

Hestia est un scénario basé sur l'idée générale selon laquelle, lorsque le coût du transport devenu trop onéreux, les entreprises et les personnes sont amenées à reconfigurer leur localisation sur le territoire par rapport aux bassins de vie et de travail ainsi qu'à leur coût de transport. Ainsi, la distribution pourrait trouver un grand intérêt à proposer des services de proximité au sein des bassins de vie de plus en plus denses dans des régions de plus en plus grandes.

Caracteristiques			Pégase	Chronos	Hestia	
		2000	2050	2050	2050	
ROUTIER	Marchandises	<i>Km/h</i>				
		<i>Routier national</i>	50	60	52	52
		<i>Routier international</i>	-	50	52	52
	Passagers	<i>Km/h</i>				
		- VP urbain -	23	30	25	25
		- TC urbain -	20	24	20	22
RAIL	Marchandises	<i>Km/h</i>				
		<i>Rail national</i>	40	40	40	40
		<i>Rail International</i>	-	40	40	40
	Passagers	<i>Km/h</i>				
		- VP région-	58	67	58	55
		- TC région -	58	68	57	54
MODES RAPIDES	Marchandises	<i>Km/h</i>				
		<i>Rail+Avion national</i>	40	63	45	45
		<i>Rail+Avion international</i>	-	70	70	70
	Passagers	<i>Km/h</i>				
		- VP inter-région -	110	115	90	90
		- TC inter-region -	80	90	80	80
		- TGV inter-region -	250	250	250	250
		- Avion -	500	500	500	500
TOTAL	Marchandises (nat/inter)	<i>Km/h</i>	43	54/52	43/52	43/52
		<i>Km/h</i>	45	50	37	37
	Passagers	<i>Km/h</i>				
Elasticités						
Vitesse/PIB		-	0,33	0	0	
T.Km/GDP Intérieur		-	0,6	0,6	0,3	
T.Km/Commerce Internat.		-	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	

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 25 Hypothèses du scénario

Hestia considère, par hypothèse, que l'élasticité vitesse/PIB est égale à 0 sur l'ensemble du territoire métropolitain. La stabilité à long terme de la vitesse moyenne est compatible avec toute une variété de combinaisons possibles entre les vitesses unitaires par mode et le poids de chaque mode dans le trafic total. Nous avons choisi une combinaison cohérente avec l'esprit des scénarios Hestia, à savoir un contrôle strict de la croissance de la vitesse sur la route compensé par une offre soutenue de transport ferroviaire rapide et performant. Ainsi, dans ce scénario, la croissance de la vitesse moyenne sur la route passe de 45km/h à 37 km/h pour les

passagers et demeure stable à 43 km/h pour les marchandises. Cela suppose que, pour que la vitesse générale soit cohérente avec les flux calculés, la vitesse moyenne du rail conventionnel augmente et que les modes rapides captent une part du trafic plus importante qu'aujourd'hui. Cette évolution n'est envisageable qu'au prix d'un développement significatif des modes rapides.

GTKM/GPKM		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050	
URBAIN	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	39	62	62	54
		- Urbain routier -	39	62	62	54
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	283	373	370	342
		- VP urbain -	263	279	310	264
		- TC urbain -	20	94	60	78
REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	34	54	54	47
		- Région routier -	34	54	54	47
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	192	378	344	265
		- VP région-	173	284	284	187
		- TC région -	20	94	60	78
INTER-REGION	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	254	408	408	332
		- Inter-région routier -	197	288	128	160
		- Inter-région rail -	50	59	232	142
		- Inter-région nav. Intérieure -	7	10	10	10
		- Inter-région modes rapides -	-	51	38	20
	<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	363	639	574	485
		- VP inter-région -	280	200	84	114
		- TC inter-region -	22	32	172	121
		- TGV inter-region -	33	177	157	186
		- Avion -	29	230	161	63
TOTAL	<i>Marchandises</i>	- TOTAL GTKM -	327	525	525	432
		<i>Passagers</i>	- TOTAL GPKM -	838	1391	1289

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 26 Répartition du trafic passagers et marchandises

Il est toutefois important de remarquer que la pénalisation globale de la vitesse et le relatif découplage entre les trafics et le PIB jouent également sur les besoins en matière de modes rapides pour équilibrer le système : en d'autres termes, les besoins en infrastructure ferroviaire rapide et les besoins en matière de transport aérien sont, avec Hestia, moindres que dans les scénarios Chronos et Pégase.

Avec Hestia, du fait des réductions des distances parcourues, la pression sur la route est moins importante. Ainsi, avec des vitesses semblables à celles de Chronos, la route représente une part de marché plus importante que dans Chronos et connaît une croissance par rapport à 2000.

Pour équilibrer le système avec ces caractéristiques, nous l'avons rendu un peu plus fluide en opérant une réorganisation spatiale. Le fait qu'il y ait moins de kilomètres parcourus signifie une fluidification du réseau et un besoin moins important d'investissements en infrastructures ferroviaires. En revanche, nous supposons un accroissement important des investissements en organisation spatiale de la production et de la distribution ainsi que de la logistique.

Sur la longue distance des marchandises, nous retrouvons la répartition modale suivante : 63% par la route ; 30% par rail normal ; 5% par rail rapide et 2% par navigation intérieure. Cela équivaut à une croissance par mode de 26% pour l'ensemble du trafic, dont une réduction de 4% pour la route ; et une croissance de 184% pour le rail ; 43% pour la navigation intérieure. Ainsi, nous pouvons remarquer que, dans ce scénario, le trafic d'export et import continue à augmenter.

GTKM		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
International					
International IntraEurope					
	Routier	37	15	15	17
	Rail	6	50	50	44
	Navigation Intérieure	2	3	3	3
	Avion	0,13	11	11	10
	Maritime	98	149	149	138
International ExtraEurope					
	Routier	1	4	4	2
	Rail	0	2	2	1
	Navigation Intérieure	1	4	4	2
	Avion	7	23	23	11
	Maritime	2388	7884	7884	3750
Total		2540	8145	8145	3978

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 27 Répartition du trafic international -marchandises-

Dans le scénario Hestia, les distances parcourues diminuent grâce à l'organisation interne mais la consommation de tonnes n'est pas remise en cause. D'une part, la création d'une structure polycentrique amène à la réduction d'un certain nombre de flux qui se produisent désormais dans le périmètre proche du centre ; d'autre part, les distances parcourues par les tonnes diminuent du fait que les tonnes importées et/ou exportées ont un parcours plus rationnel du point de vue logistique.

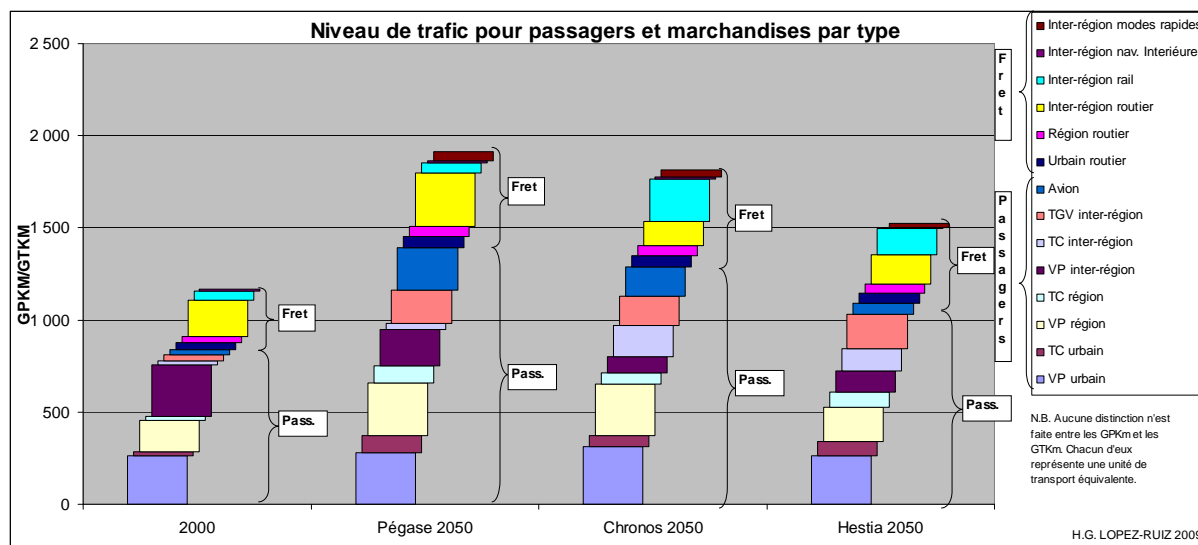


Figure 43 Trafic par type -passagers et marchandises-

La réduction des kilométrages parcourus et la rationalisation des itinéraires conduiraient certainement à se poser la question sur la situation des ports français. Selon les estimations des détournements du trafic maritime par des ports étrangers, les autorités du port du Havre ont calculé que ces détournements se sont élevés, en 2004, sur le marché du trafic conteneurisable, à 43,4% à l'exportation et à 51,5% à l'importation (Rapport Cour des Comptes). Bien que ces chiffres ne soient pas directement comparables avec ceux relatifs à la part de marché des ports étrangers calculés en 1994 : 12,76% à l'export et 8,85% à l'import (rapport au Sénat). L'ensemble des chiffres amène à envisager que, dans une logique d'évolution Hestia, la question de la situation des ports français risque de se poser très rapidement.

Dans le scénario Hestia, si nous envisageons une contrainte sur la capacité à payer plus de vitesse -par exemple, avoir recours au transport aérien au lieu du transport terrestre- et si nous

supposons une forte hausse du coût du transport, la structure productive du système de transport peut être modifiée par la réduction des distances parcourues. Par conséquent, nous pouvons supposer que le système économique s'adapte à un coût du transport relativement élevé et que, dans un souci de minimisation des coûts, il cherche à relocaliser les activités.

Les particuliers, tout comme les entreprises, s'efforcent de maximiser leur profit en réduisant les distances parcourues, en rapprochant les entreprises des lieux d'habitation tandis que, parallèlement, les personnes recherchent des services de proximité. Par conséquent, il semble que le choix polaire d'une adaptation du système par le temps de transport (cf. Chronos) puisse être une adaptation par les distances.

Comme nous pouvons le voir sur les graphes présentant le trafic des passagers, la logique Hestia ressemble beaucoup à celle de Chronos, la différence se situant 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 réinvesti dans la relocalisation. Le coût du transport devenu trop onéreux, les entreprises sont 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 sa disposition à payer, une entreprise préférera se rapprocher de son aire de marché plutôt que de continuer à transporter à des prix exorbitants.

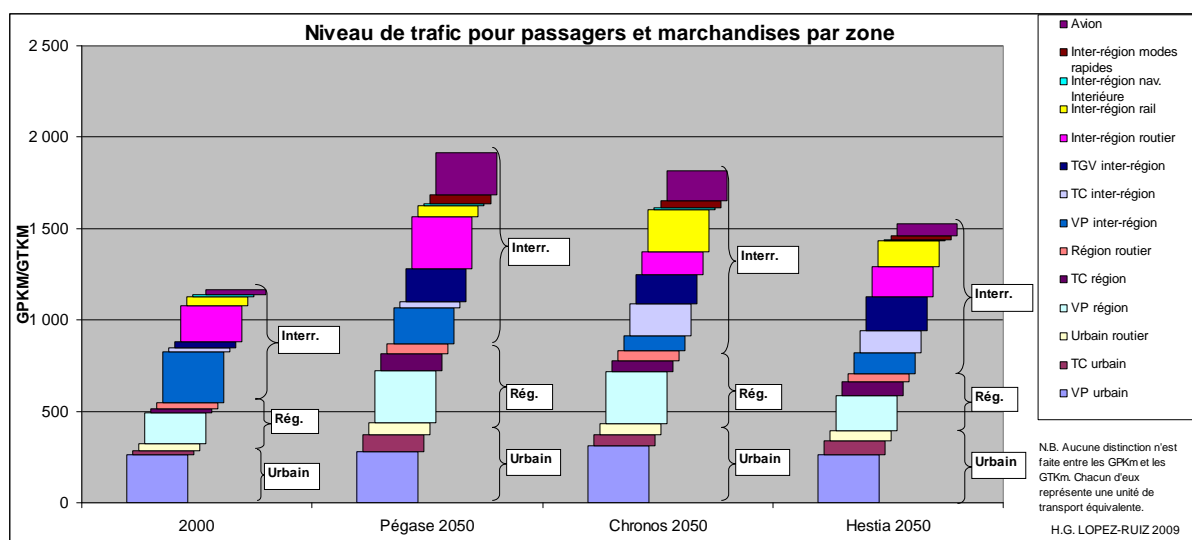


Figure 44 Trafic par zone -passagers et marchandises-

Ainsi, comme nous pouvons l'observer, Hestia aboutit à une augmentation des kilométrages moins importante que Chronos et Pégase sans remettre en cause le nombre de passagers ou de tonnes consommées ou produites par la France. 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 lieux d'activité et d'organisation de la production et de la consommation.

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

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 en définitive moins favorable au ferroviaire. Ce résultat paradoxal mérite d'être souligné : la proximité limitant les possibilités de massification, elle donne moins de chances au ferroviaire.

2.4.2 Emissions et politiques publiques

La logique de rapprochement du scénario Hestia a un impact sur les émissions de CO₂. Même si, grâce à la réduction des kilométrages moyens, les technologies de type hybride retrouvent, dans la configuration de Hestia, une efficacité accrue quant aux réductions des émissions unitaires du trafic routier, l'importance relative de cette efficacité 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 le scénario Hestia, pas plus que dans le scénario Chronos, nous ne sommes en état d'atteindre le facteur 4 pour le fret.

1000tCO2		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
URBAIN					
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	7050	2336	2711	2208
	- Urbain routier -	7050	2336	2711	2208
<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	35216	1913	2042	1786
	- VP urbain -	34618	1737	1930	1639
	- TC urbain -	599	176	113	146
REGION					
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	10651	4345	4716	3936
	- Région routier -	10651	4345	4716	3936
<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	17898	6215	6215	4134
	- VP région-	16838	6075	6075	4002
	- TC région -	1060	141	141	132
INTER-REGION					
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	22135	21198	10139	10925
	- Inter-région routier -	21410	19119	8508	10568
	- Inter-région rail -	475	0	0	0
	- Inter-région nav. Intérieure -	249	356	356	356
	- Inter-région modes rapides -	-	1722	1275	0
<i>Passagers</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	24752	18460	10625	6786
	- VP inter-région -	18096	6749	2210	3400
	- TC inter-region -	721	50	269	190
	- TGV inter-region -	0	0	0	0
	- Avion -	5936	11661	8146	3196
TOTAL					
<i>Marchandises</i>	- TOTAL 1000tCO2 -	39836	27879	17566	17069
	- TOTAL 1000tCO2 -	77867	26589	18883	12705

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 28 Emissions de CO₂ pour les passagers et les marchandises

Les résultats sont meilleurs pour les passagers, où un facteur 5 est obtenu avec les mêmes hypothèses technologiques que dans Chronos et Pégase. Mais cela suppose que l'avion soit très fortement contraint en volume de trafic.

Ces changements d'organisation amènent aussi des changements sur l'utilisation des véhicules qui sont positifs pour atteindre l'objectif du facteur 4. La logique de réduction des distances parcourues par les marchandises conduit à se poser un certain nombre de questions quant aux développements technologiques. Le choix des investissements en R&D au niveau des technologies motrices ainsi que des technologies de stockage d'énergie est défini par la stratégie générale de laquelle découle une nouvelle organisation.

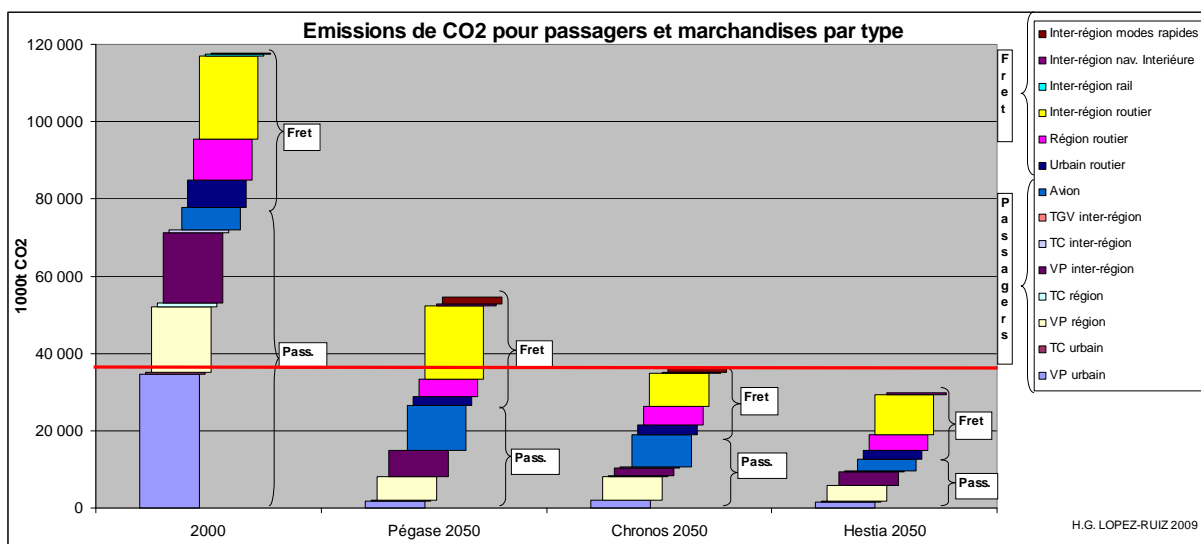


Figure 45 Emissions par type -passagers et marchandises-

Dans le scénario Hestia, en 2050, grâce à la fiscalité sur l'énergie et le CO₂, le contenu en énergie de la nourriture, calculé sur la base de l'énergie nécessaire pour les engrais, le traitement et le transport, est réduit sensiblement, particulièrement du fait de la réduction des distances du transport.

En raison de la hausse globale du coût de transport, le trafic à longue distance se concentre progressivement sur le transport de produits aux spécificités géographiques fortes en raison du climat, de la localisation des ressources naturelles ou des traditions industrielles et culturelles.

En fait, l'espace géographique où il est encore rentable de disséminer les usines entrant dans le cycle de production afin de bénéficier de facteurs de production meilleur marché est progressivement réduit par les hausses des coûts de transport.

1000tCO2		2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
International					
International IntraEurope	Routier	3941	2224	2224	1096
	Rail	38	0	0	0
	Navigation Intérieure	67	222	222	95
	Avion	120	15677	15677	6450
	Maritime	978	3229	3229	1378
International ExtraEurope	Routier	142	290	290	138
	Rail	3	0	0	0
	Navigation Intérieure	47	154	154	73
	Avion	2281	5648	5648	2686
	Maritime	13061	43118	43118	20508
Total		20678	70562	70562	32424

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 29 Emissions pour le trafic international -marchandises-

La relocalisation des plateformes industrielles est basée sur la nouvelle législation concernant le zonage industriel, qui tient compte des effets externes de tout le processus de production, y compris le transport. La révolution de la technologie de l'information rend également possible l'application de nouvelles technologies intelligentes dans le transport combiné.

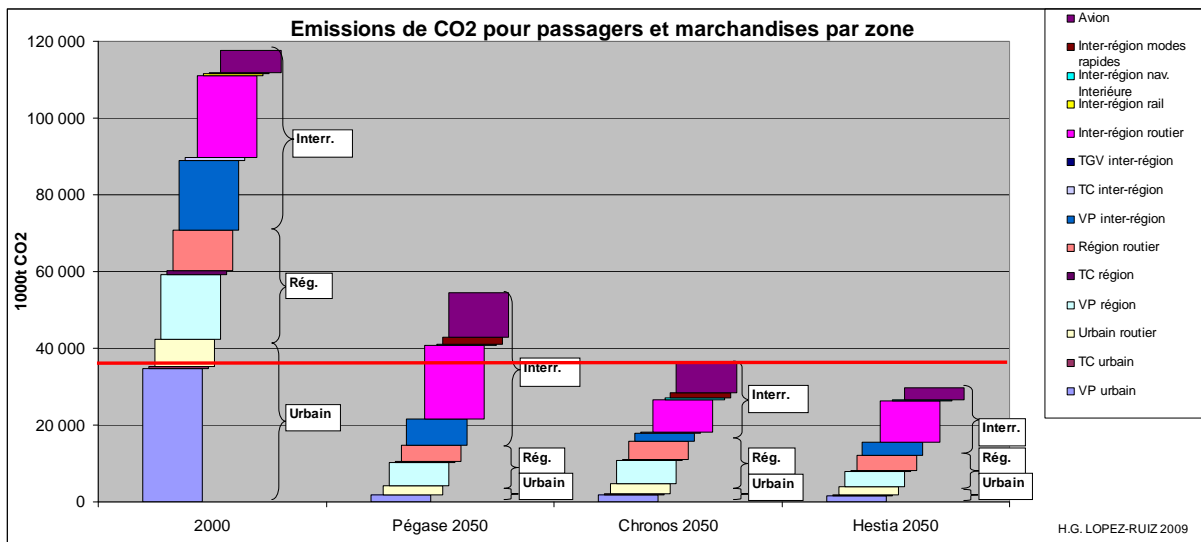


Figure 46 Emissions par zone -passagers et marchandises-

Dans la logique d'Hestia, l'arbitrage se joue non seulement sur les politiques publiques incitant à adopter des modes plus propres mais aussi sur l'implantation spatiale des activités et l'organisation de la production et de la consommation. Ainsi, si nous supposons une contrainte -endogène ou exogène- sur la capacité à payer plus de vitesse et si nous supposons une forte augmentation du coût du transport (cohérent avec la contribution climat et énergie, autour de 320 euros par tonne de CO₂ émise), le système de transport peut amener à des changements dans la structure productive de l'économie en intervenant sur les distances parcourues. Il apparaît donc que la conséquence en sera une forte dégradation de la fluidité des infrastructures routières de proximité et expliquera un besoin croissant de l'optimisation des voiries urbaines et régionales. Ainsi, le plus important effort d'investissement devra être lié aux transports en commun urbains et régionaux.

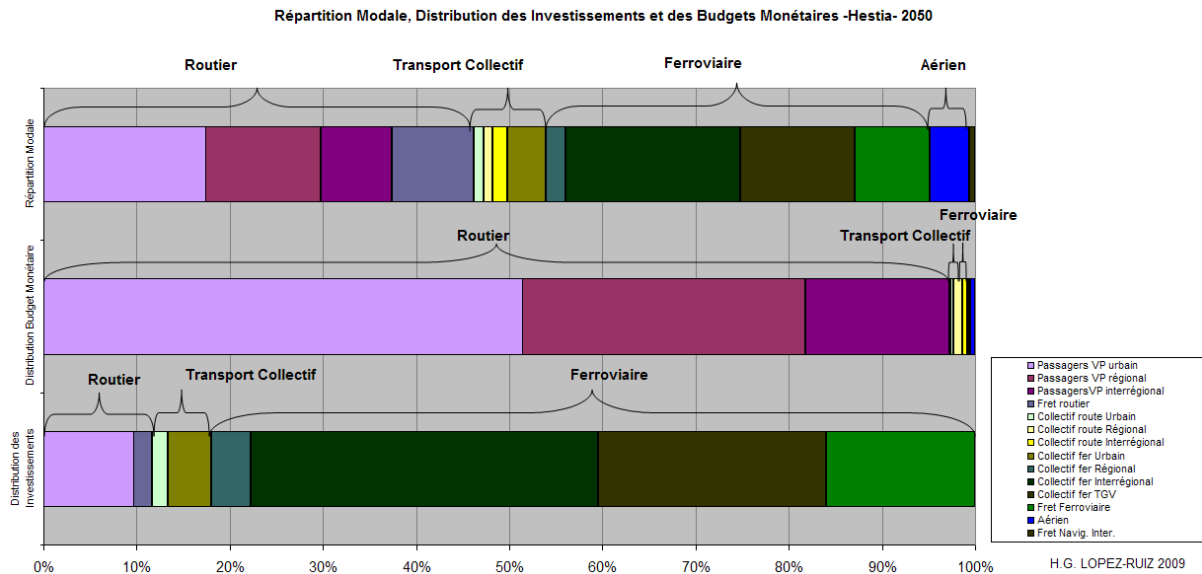


Figure 47 Distribution du budget transport des ménages, répartition modale et besoins en investissement

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

A 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 qui demande une amélioration limitée des infrastructures routières, une forte baisse du coût relatif des TC, une forte amélioration du niveau de service des TC

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 ferroviaire. 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 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 régional augmentent fortement et exigent une très forte augmentation de l'optimisation des infrastructures routières de proximité.

En Mds€	Modes	2050 Pégase	Per annum	2050 Chronos	Per annum	2050 Hestia	Per annum	Année 2007
Investissement	Route	1043	21	384	8	140	3	12
	Fer	747	15	1529	31	992	20	2
	TU+TCNU	137	3	74	1	77	2	2
	Autres	-	-	-	-	-	-	1
	Total	1927	39	1987	40	1209	24	18
H.G. LOPEZ-RUIZ 2009								

Tableau 30 Besoins en investissement par type d'infrastructure

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 qui puissent avoir une influence sur le coût d'immobilisation du transport des marchandises et la longueur des déplacements. Ce type de politiques peut avoir une influence importante sur des nouveaux arbitrages appelant à une organisation associant des bassins de vie concentrés à et un système productif moins concentré -et donc plus proche des nombreux bassins de vie. Ainsi, l'analyse multicritère du module « politiques publiques » de TILT fait apparaître l'importance des effets des politiques publiques liées à la gestion du transport et de 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 du taux d'utilisation des véhicules.

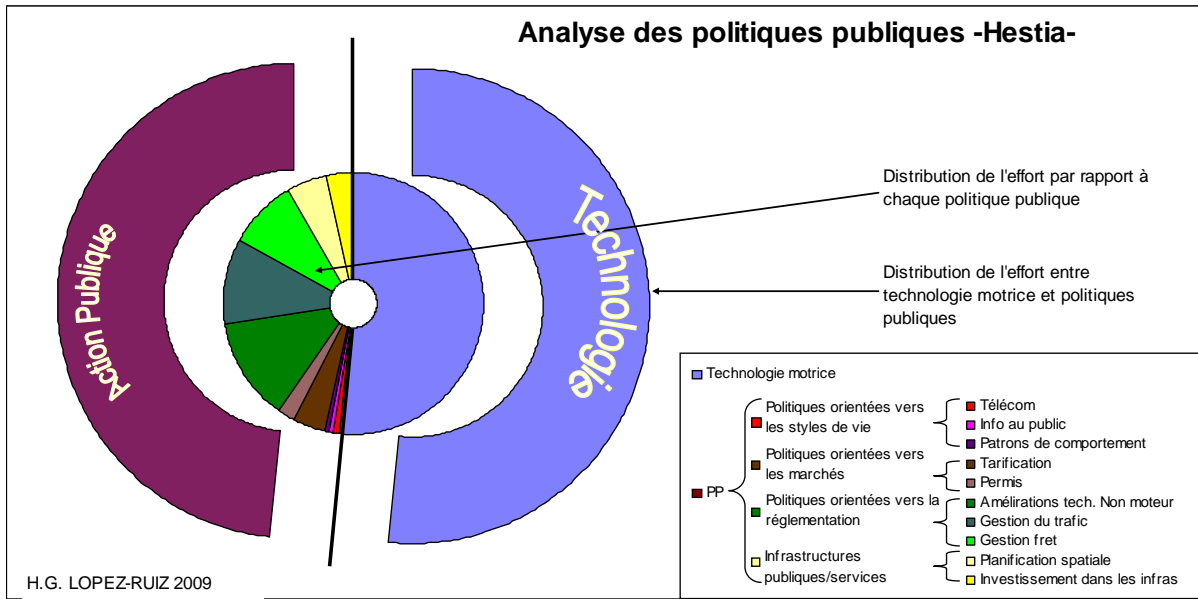


Figure 48 Analyse multicritère du poids des politiques publiques

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 posé par les nouvelles technologies de motorisation est l'autonomie des véhicules, les nouvelles technologies peuvent être plus rapidement disponibles sur les VUL et les VP.

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.

Politique Publique	Apport	Apport	Sentier de politiques publiques/Policy package
Télécom	2%		Politiques orientées vers les styles de vie
Information au public	2%		
Patrons de comportement	3%	7%	
Tarifification	1%		Politiques orientées vers les marchés
Permis	1%	2%	
Améliorations tech. Non-moteur	10%		Politiques orientées vers la réglementation
Gestion du trafic	13%		
Gestion fret	30%	53%	
Planification spatiale	12%		Infrastructures publiques/services
Investissement dans les infras	26%	38%	

H.G. LOPEZ-RUIZ 2009

Tableau 31 Poids des politiques publiques et sentier des politiques publiques

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. Les développements vont aussi dans le sens d'un système polycentrique interconnecté et il existe un besoin grandissant d'investissements pour des technologies visant des changements sur la sûreté des véhicules, leur fiabilité et leur autonomie.

La relocalisation des plateformes industrielles et leur nouvelle organisation diminue sensiblement la distance moyenne du transport de marchandises. Le transport de fret ferroviaire est utilisé également sur des distances courtes, quand les volumes à transporter sont suffisamment importants. La plateforme industrielle est organisée de façon que les sous-traitants soient situés près des usines principales; la distance moyenne de transport est réduite sensiblement, sans amoindrir la possibilité de recourir à des fournisseurs extérieurs (outsourcing). Dans les zones commerciales des centres-ville historiques, les pièces de stockage sont progressivement reconverties en extension de boutique, exploitant de ce fait la place disponible pour la présentation des produits et la réception des clients.

Grâce aux centres de distribution locaux nouvellement installés, les problèmes du trafic se sont sensiblement réduits, et les magasins peuvent même offrir davantage de produits, car ceux-ci peuvent être apportés à la demande, sans créer de problèmes de trafic ou

d'environnement. Le coût de transport diminue et cela compense, dans certains cas spécifiques, la perte en économies d'échelle et cela aura également des impacts favorables sur l'emploi.

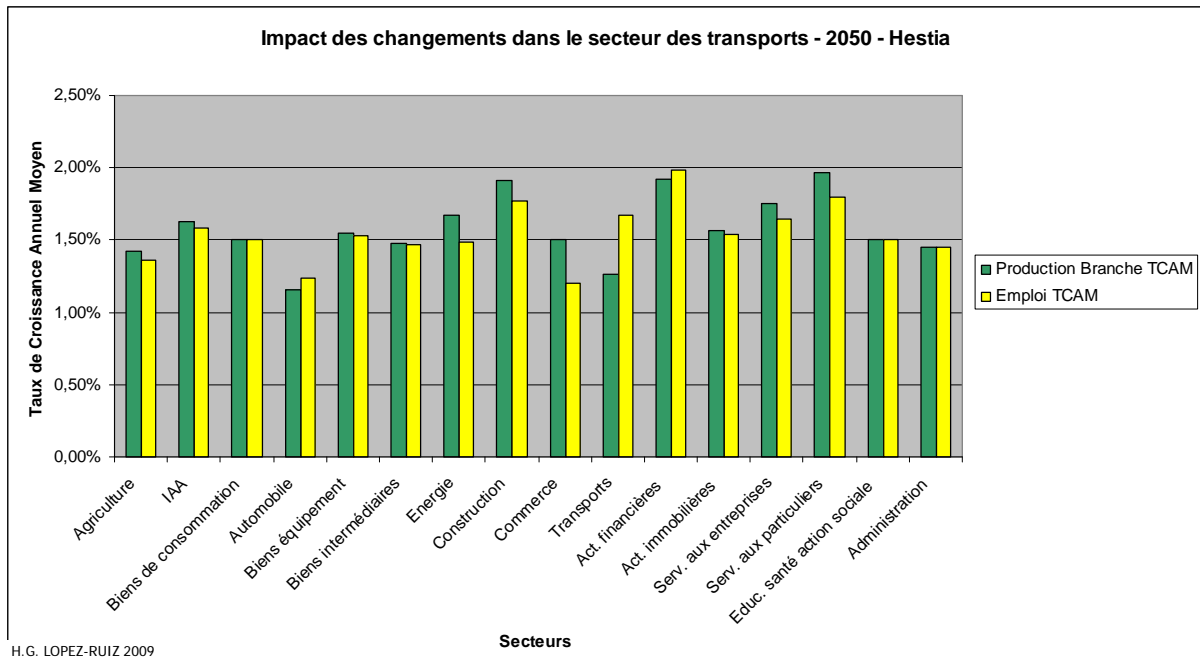


Figure 49 Impact économique par secteur

Ainsi, même si les distances moyennes parcourues diminuent d'environ 20% sur les routes, l'activité économique ne connaît pas une baisse. Hestia est un scénario qui appelle à la réorganisation du système pour mieux tirer profit des véhicules électriques et hybrides, tout à fait adaptés au transport urbain et régional. Le transport interrégional et intra-européen est réalisé prioritairement par le rail et par les voies navigables ; le transport des marchandises extra-européennes par voie maritime, et les ports connaissent un fort développement des infrastructures ferroviaires ainsi qu'un afflux grandissant de touristes en croisière.

Une logique de diminution des kilométrages est adoptée sur la totalité de la chaîne logistique. L'arrivage au port ne se fait plus selon une logique basée uniquement sur le coût de transport. Désormais, la destination finale est aussi prise en compte dans le calcul logistique. La part des marchandises françaises passant par des ports étrangers baisse sensiblement ainsi que le trafic de transit.

	Consommation intermédiaire		Production Branche		Emploi	
	TCAM	TC	TCAM	TC	TCAM	TC
Agriculture	1,6%	117,9%	1,4%	102,5%	1,4%	96,8%
IAA	1,7%	131,6%	1,6%	125,3%	1,6%	119,2%
Biens de consommation	1,6%	121,2%	1,5%	111,8%	1,5%	111,3%
Automobile	1,1%	75,9%	1,0%	68,4%	1,1%	77,0%
Biens d'équipement	1,6%	122,9%	1,6%	121,5%	1,6%	116,7%
Biens intermédiaires	1,5%	114,3%	1,5%	108,6%	1,5%	107,3%
Energie	1,5%	114,8%	1,8%	138,6%	1,4%	103,4%
Construction	1,8%	145,8%	1,9%	158,7%	1,8%	140,9%
Commerce	1,6%	117,0%	1,5%	111,6%	1,2%	78,9%
Transports	1,6%	123,1%	1,6%	116,3%	1,9%	151,2%
Act. financières	1,8%	140,4%	2,0%	170,0%	2,1%	187,2%
Act. immobilières	1,7%	128,6%	1,6%	118,1%	1,5%	114,3%
Serv. aux entreprises	1,7%	130,8%	1,8%	142,1%	1,7%	126,8%
Serv. aux particuliers	1,8%	139,5%	2,0%	167,7%	1,8%	145,8%
Educ. santé action sociale	1,6%	121,3%	1,5%	111,8%	1,5%	110,5%
Administration	1,7%	130,8%	1,4%	105,3%	1,4%	105,1%
H.G. LOPEZ-RUIZ 2009						

Tableau 32 Taux de croissance par secteur

Des parties entières de la production et de la logistique sont confiées en sous-traitance à des entreprises locales qui gèrent la production et la logistique de quelques produits semblables commercialisés sous différentes marques. De cette manière, dans Hestia, la carte des flux des passagers et des marchandises est modifiée, et une logique de massification couplée à la proximité est à l'œuvre.

Un grand développement visant l'optimisation des transports est réalisé grâce aux nouvelles technologies d'information embarquées. Désormais, les déplacements sont réalisés suivant une logique de maximisation de l'utilité par rapport à une refondation des espaces de vie et de production pour réduire les distances, sans pour autant perdre en mobilité ou en choix des produits.

Avec Hestia, est développé un commerce plus proche des zones de consommation. De ce fait, l'autonomie des véhicules routiers ne pose pas un problème au niveau des distances et la recherche porte plutôt sur le développement de camions VUL et VP possédant une capacité plus importante.

Ainsi, l'industrie automobile connaît toujours une forte croissance, voire supérieure à celle de Pégase, du fait de la demande grandissante pour des produits très technologiques et haut de gamme.

Les consommateurs s'habituent à pouvoir disposer de magasins de proximité. Les achats par Internet deviennent quotidiens pour les produits courants et pour les produits de consommation, qui ne se trouvent pas dans les « petites surfaces de quartier ».

Les manques du commerce électronique sont comblés par le développement d'un grand nombre de normes de qualité et d'harmonisation des produits. Les consommateurs sont habitués à consulter le catalogue de « matériaux-couleurs » avant de commander des produits « tactiles ». La distribution met en œuvre des circuits de livraison très détaillés qui livrent aux surfaces commerciales les commandes spéciales des habitants du quartier en même temps que le stock de produits à vendre.

Des points de livraison par zone voient le jour et deviennent même une partie importante de l'activité de quelques entreprises qui ont des points de livraison de proximité partout en France. Chaque zone commerciale ou rue principale possède son propre centre local de distribution tenu par un gérant.

Les producteurs voient dans la proximité et les offres de co-transport (transport partagé par plusieurs entreprises pour augmenter l'effet de masse) un moyen de proposer des produits de façon rapide et peu onéreuse du point de vue environnemental et économique, aux distributeurs. Certains y voient une opportunité pour commercialiser leurs produits directement aux consommateurs. Les producteurs et distributeurs trouvent un sens à l'inter-massification de leurs produits et au co-transport, qui deviennent des pratiques courantes. Les sociétés de 3PL développent des schémas de partenariat entre leurs différents clients, en même temps que certaines entreprises commencent à développer des services de co-transport intégré avec leurs concurrents et leurs distributeurs.

La logique de massification pousse à avoir des livraisons des pièces détachées massifiées qui, pour un poids égal, occupent moins de volume que le produit fini. De ce fait, nous assistons à

un accroissement des usines de dépotage et de traitement des marchandises sur place ainsi que du nombre prestataires 4PL (fourth party logistics). De même, les producteurs demandent l'instauration de normes strictes en matière de standardisation et de qualité afin de pouvoir massifier et éviter les retours de produits.

Ainsi, comme nous pouvons l'observer, Hestia connaît une augmentation des kilométrages moins importante que Chronos et Pégase sans remettre en cause le nombre de tonnes consommées ou produites par la France.

Points importants de Hestia

Hestia présente un niveau d'investissement en infrastructures proche du niveau d'investissements d'aujourd'hui. Du fait d'une fluidification du réseau routier, la plupart de ces investissements devraient porter sur les TC.

Cela dit, étant donné que Hestia est essentiellement axé sur un changement dans l'utilisation de l'espace, cela implique des changements importants au moins à deux niveaux : au niveau de la conception de l'espace et des territoires par rapport à leur gouvernabilité et au niveau des investissements en aménagement (qui devraient, bien évidemment, beaucoup augmenter et se présenter comme la contrepartie à des investissements stables en transport).

En outre, Hestia présente une situation dans laquelle, du fait d'une amélioration de l'accessibilité, la concurrence entre les différents modes est plus avantageuse pour les TC et permet de supposer qu'ils obtiennent des meilleurs résultats dans une situation où l'assiette fiscale de la taxe CO₂ est plus réduite.

En revanche, il faut prendre en compte que le scénario Hestia suppose des contraintes fortes sur le secteur aérien, qui ne devrait pas connaître une croissance supérieure à 1,5% par an (contre les 4% à 7% que ce secteur connaît aujourd'hui).

Les changements dans la conception des territoires et les contraintes fortes sur l'aérien pourraient impliquer la nécessité d'un système TGV-Europe extrêmement performant au niveau des passagers et du fret.

Conclusion

Depuis trente ans, nous assistons à un mouvement d'étalement des villes, déclenché par le développement de la motorisation personnelle et renforcé par un fort développement des moyens de transport en commun ainsi que des transports routiers. Ce mouvement d'étalement a permis de renforcer le développement de régions-métropoles qui couvrent des espaces géographiques de plus en plus importants et qui s'insèrent dans un marché européen très actif.

Cette situation consolide les flux vers les régions-métropoles les plus actives et, ainsi, fait apparaître de nouvelles pressions qui s'exercent sur les régions françaises et dont la dimension est de plus en plus métropolitaine. Ainsi, il faut aborder ces nouvelles évolutions par une stratégie globale qui repose sur des logiques d'intérêt commun et de solutions partagées aux différents niveaux administratifs. Au cœur de cette problématique, nous retrouvons la question centrale du développement économique, qui repose sur l'amélioration de la compétitivité des zones métropolitaines, ce qui suppose une action dans trois domaines : le développement des entreprises, le développement des compétences et la rénovation urbaine.

A cette problématique, vient s'adosser la question du réchauffement climatique, qui s'impose comme un faisceau central d'une réflexion sur la relation entre le développement économique et son impact sur l'environnement. Dans ce cadre, au-delà des éventuels problèmes de gouvernance, c'est la soutenabilité de certaines pratiques et de certains comportements qui risque de poser problème. D'où l'importance d'un exercice de prospective qui puisse permettre de préparer la construction de stratégies communes et cohérentes en s'interrogeant sur les conditions de viabilité des villes, sur le foyer de nuisance qu'elles peuvent devenir, sur la redynamisation des structures urbaines et sur la saturation des infrastructures dans un cadre qui prenne en compte les contraintes climatiques.

Il apparaît ainsi comme essentiel de considérer les pratiques de mobilité dans le temps, et de les relier aux politiques de transport et à la conjoncture économique ainsi qu'aux ruptures sociales. De même, il est important d'analyser ces problématiques en partant des trois dimensions interactives des mobilités –quotidiennes, résidentielles et professionnelles– afin d'appréhender l'économie par rapport au (dys)fonctionnement des marchés du transport, de

l'habitat et de l'emploi, dans un cadre où les contraintes naturelles (l'environnement, les ressources, le temps) imposent des limites aux arbitrages possibles.

En conséquence, la question du temps de transport et de son coût deviennent centrales dans cette réflexion car le temps que les personnes sont prêtes à (ou peuvent) passer dans un moyen de transport pour accomplir leurs activités quotidiennes (dont dépend l'économie d'un territoire) et le coût qu'elles sont prêtes à (ou peuvent) supporter limite la taille des villes fonctionnelles à un rayon voisin de la distance qu'il est possible de parcourir dans ce laps de temps -suivant le niveau de la congestion des infrastructures et le niveau de performance des transports.

Ainsi, la vitesse du transport apparaît comme l'élément central dans une économie définie par une fonction de production, dans laquelle le transport est un input nécessaire au fonctionnement des autres marchés. Dans ce cadre, le fait que le transport aura une saturation différente selon les comportements des personnes et des entreprises est à souligner, notamment parce que les différences en comportement sont fonction du coût généralisé du transport et, de ce fait, des vitesses modales. Ainsi, les rythmes de saturation des différents modes de transport sont influencés par la congestion des infrastructures en fonction de la demande et de la capacité de celles-ci à y répondre.

En conséquence, les arbitrages propres aux calculs de maximisation des ménages et des entreprises se feront par rapport à la qualité de l'offre de transport, à leur allocation budgétaire en matière de transport et au coût total de leurs choix.

A partir de ces éléments, nous observerons comment les arbitrages des ménages et des entreprises feront évoluer le système de transports dans le temps et, plus encore, comment les politiques publiques agiront sur le système (au niveau des émissions et au niveau financier). Les différentes politiques publiques agissent sur ce système à travers différents canaux et ont des impacts différents. Force est de constater que, vu l'importance du transport dans une économie, cette planification des politiques publiques requiert une analyse détaillée des impacts de l'action publique afin d'intégrer le nouveau vecteur d'input transport dans la fonction de production de l'économie.

Pour cette raison, il semble particulièrement important de planifier des sentiers de politiques publiques vis-à-vis des transports et des objectifs sociétaux, en alliant l'analyse des arbitrages des ménages et des entreprises au maintien de l'objectif du facteur 4 comme référence.

Par conséquent, dans cette recherche, nous avons fait en sorte d'établir un cadre d'étude qui puisse à la fois intégrer une analyse qualitative et une analyse quantitative dans une optique backcasting afin de construire des scénarios visant un objectif à long terme. Pour ce faire, nous avons construit des scénarios qui se réfèrent au secteur du transport et nous avons analysé les effets sur l'économie et le système de transports des changements liés aux différentes politiques publiques.

Ainsi, à travers cette modélisation, nous avons cherché à prendre en compte les caractéristiques du système de transports, son coût et l'éventail des choix permettant aux personnes et des entreprises de satisfaire leurs besoins en matière de transport en maximisant leur utilité et en minimisant leurs coûts dans un cadre de « déploiement » des politiques publiques et des optimisations techniques (en forme de réglementation) qui influenceront sur la technologie de production - à la fois sur le plan organisationnel et sur le plan technique. Ce déploiement de politiques publiques et de nouvelles réglementations entraînera des changements sur la globalité de la structure économique et des transports. Ceux-ci auront un coût, mais, en contrepartie, seront bénéfiques à l'environnement. Ces coûts aussi bien que ces bénéfices ont été quantifiés et analysés afin de proposer un plus grand nombre d'indicateurs concernant la viabilité des politiques publiques.

Ainsi, nous aboutissons à un modèle intégré qui détermine les besoins en transports par rapport aux liens macroéconomiques existant dans une économie, qui les met en rapport avec les comportements microéconomiques des acteurs de l'économie et qui permet d'observer les effets induits par le déploiement des politiques publiques ainsi que par les changements technologiques.

Cet effort de modélisation a été réalisé en ayant conscience qu'un modèle quantitatif de transport est un outil d'aide à la décision avec lequel, compte tenu du nombre considérable d'éléments qui régissent une décision, il n'est possible de prendre en compte que quelques

éléments. A partir de ce cadre d'analyse, plusieurs scénarios ont été construits et analysés, cela nous a permis de parvenir à plusieurs conclusions situées à différents niveaux : sur la faisabilité du facteur 4 ; sur les politiques publiques à mettre en place ; sur les ruptures qui s'imposent comme des freins au développement tendanciel :

- **sur la faisabilité du facteur 4 :**

Nous avons constaté que la technologie permet de réaliser 50% des réductions et que les autres 50% proviendront des changements de comportement. En outre, nous avons souligné le fait que le facteur 4 n'implique à aucun moment un retour en arrière où une décroissance économique. Au contraire, il est possible de réaliser un facteur 4 tout en augmentant la mobilité des personnes et des marchandises ;

- **sur les politiques publiques à mettre en place**

Nous avons observé que les différents sentiers des politiques publiques représentent des stratégies dans lesquelles existent des interactions très fortes entre la politique principale de chaque scénario, sa force et les besoins en matière de politiques d'accompagnement. Dans tous les cas, ces politiques impliquent, d'une manière ou d'une autre, le changement des comportements à travers le temps de transport et/ou le changement des comportements à travers les distances de transport ;

- **sur les ruptures qui s'imposent comme des freins au développement tendanciel :**

Le CO₂ ne représente qu'une partie des nuisances environnementales liées aux transports, et par conséquent il faudra aller au delà du problème posé par l'émission excessive du CO₂ afin d'analyser des stratégies globales se référant à d'autres problèmes liés au transport.

Des scénarios comme Chronos ou Pégase -dans lesquels la taxation des tonnes de CO₂ conduira à un changement des comportements et à une amélioration des technologies permettant d'aboutir à une baisse des émissions- apportent une solution au problème des émissions de CO₂. En revanche, ils ne résolvent qu'une partie du problème. Avec Pégase, se pose la question du besoin très important en nouvelles infrastructures ; avec Chronos, nous observons que l'efficacité de l'enchérissement de la vitesse pourrait, certes, 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 coûteux mais le besoin en investissements pour l'aménagement des villes est beaucoup plus important qu'avec Pégase ou Chronos.

Ainsi, nous voyons donc naître de nouveaux besoins en matière d'analyse. D'une part, nous retrouvons la question centrale de la temporalité, sur laquelle doivent intervenir les différentes politiques publiques, ainsi que la question des moments auxquels les différents investissements sont à même d'être rentabilisés de façon optimale. Des incertitudes apparaissent sur le financement de tous ces changements et surtout sur la cohérence entre les différentes actions à mettre en place.

En outre, nous sommes confrontés également à des questions portant sur l'équité des politiques publiques ainsi que sur leur viabilité et les effets qu'il faudra en attendre. Enfin, se dessine aussi le problème difficile à résoudre du « dernier kilomètre ».

Tous ces éléments exigent un changement de la manière d'aborder les problèmes en s'efforçant de ne plus déconnecter les actes de leurs conséquences et de prendre en compte la nécessité de créer des outils intégrés d'aide à la décision qui soient focalisés sur les activités et les processus qui régissent une économie et qui font partie des arbitrages. Que ce soit un usager, une entreprise ou l'administration publique, il est nécessaire d'intégrer l'individu ou l'entité concernée à la prise de décision, dans une optique de recherche du moyen optimal pour parvenir à l'objectif recherché.

Bibliographie.

- 1 ABRAHAM-FROIS, G.. Dynamique Economique. 9ème. Paris, France: Dalloz, 2002.
- 2 AHMAD, N.. "A Framework for Estimating Carbon Dioxide Emissions Embodied in International Trade of Goods." Measuring Sustainable Development: Integrated Economic, Environmental and Social Frameworks, OECD., Science, Technology and Industry Directorate. 2004.
- 3 APOSTOL, T.M.. Calculus. Segunda. Mexico: Reverté, 1998.
- 4 Australian Public Service Commision. "Changing Behaviour. A Public Policy Perspective." Contemporary Government Challenges, Australian Government. Commonwealth of Australia, 2007.
- 5 BANISTER, D. PUCHER, J. LEE-GOSSELIN, M.. "Making Sustainable Transport Politically and Publicly Acceptable: Lessons from the EU, USA and Canada." Chap. in www.Itls.U Syd.Edu.Au.
- 6 BANISTER, D. STEAD, D. STEEN, P. AKERMAN, J. DREBORG, K. NIJKAMP, P. SCHLEICHSER-TAPPESER, R.. European Transport Policy and Sustainable Mobility. London: Spon, 2000.
- 7 BARBERON, M.. "Les Chiffres de la Congestion Routière." Solutions Transport (11 décembre 2002).
- 8 BAUTISTA, J. PEREIRA, J.. "Ant Algorithms for a Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problem." European Journal of Operational Research 177 (2007): 2016-2032.
- 9 BEN-AKIVA, M. & LERMAN, S.R.. Discrete Choice Modeling: Theory and Application to Travel Demand. MIT Press Series in Transportation Studies. USA: MIT Press, 1985.
- 10 BEN-AKIVA, M. MEERSMAN, H. VAN DE VOORDE, E.. Recent Developments in Transport Modelling. UK: Emerald, 2008.
- 11 BORIO, C. FILARDO, A.. "Globalisation and Inflation: New Cross-Country Evidence on the Global Determinants of Domestic Inflation." BIS Working Papers, Bank for International Settlements. Switzerland, BIS. May 2007.

- 12 BOWS, A & ANDERSON, K.L.. "Policy Clash: Can Projected Aviation Growth be Reconciled with the UK Government's 60% Carbon Reduction Target." *Transport Policy* 14 (2007): 103-110.
- 13 BRAIBANT, M.. "Elaboration du Tableau Des Entrées Intermédiaires Pour Les Anées de Base.," Paris, France, INSEE.
- 14 BRUNEL, J.. "Freight Transport and Economic Growth: an Empirical Explanation of the Coupling in the EU Using Panel Data." Working Paper, Laboratoire d'Economie des Transports. Lyon, France, 2005.
- 15 CAZALA, A. et alii. "Rapport Sur la Comparaison au Niveau Européen Des Coûts de Construction, d'Entretien et d'Exploitation Des Routes.," Contrôle général économique et financier, Conseil général des ponts et chaussées. Paris, Décembre 2006.
- 16 CHIANG, A.C.. *Métodos Fundamentales de Economía Matemática*. 3rd Edition. Chile: McGraw-Hill, 1999.
- 17 CHOI, Y.C. HUMMELS, D. XIANG, C.. "Explaining Import Variety and Quality: the Role of the Income Distribution.," Purdue University. August 2006.
- 18 CITEPA. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France. "SECTEN 2008." Publications Inventaires. Français. http://www.citepa.org/publications/Inventaires.htm_inv1: CITEPA, 15/05/2008.
- 19 CLEMENT, K. "Backcasting as a Tool in Competitive Analysis." ISBM Report 24, University of Waterloo. 1995.
- 20 Commission des Comptes des Transports de la Nation. *Les Comptes Des Transports*, Ministère de l'Ecologie de l'Energie du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire. Paris, 2007.
- 21 Conseil Général des Ponts et Chaussées. "Démarche Prospective Transports 2050.," Ministère des Transports de l'Equipement du tourisme et de la mer., Conseil Général des ponts et chaussées. Mars 2006.
- 22 Consortium VLEEM. "VLEEM 2." FINAL REPORT, EC/DG Research., 2002.
- 23 Cour des Comptes. "Les Comptes Des Transports en 2004.," DAEI-SESP. Paris, La Cour des Comptes. juillet 2005.
- 24 CROZET, Y.. "Prospective Pour Une Mobilité Durables." *Transports* 416 (2002): 413-424.
- 25 CROZET, Y. JOLY, I.. "Budgets Temps de Transport: Les Sociétés Tertiaires Confrontées à la Gestion Paradoxale du Bien le Plus Rare." *Les Cahiers Scientifiques du Transport* 45 (2004): 27-48.

- 26 CROZET, Y. LOPEZ-RUIZ, H.G. CHATEAU, B. BAGARD, V (ENERDATA) (LET). "Scenarios LET-ENERDATA." Scenarios de Mobilité Durable Sous Contrainte d'un Facteur 4, Lyon, 2008.
- 27 CROZET, Y. MUSSO, P. MARLOT, G.. Réseaux, Services, Territoires: Horizon 2020. Paris: Editions de l'Aube, 2003.
- 28 DESMET, K. & PARENTE, S.L.. "Bigger Is Better: Market Size, Demand Elasticity and Resistance to Technology Adoption." Discussion Paper No. 5825, Centre for Economic Policy Research. London, UK, Septembre 2006.
- 29 DOCKES, P.. L'Enfer ce n'Est Pas Les Autres!. Paris: Descartes & Cie, 2007.
- 30 DORIGO, M. Di CARO, G. GAMBARDELLA, L.M.. "Ant Algorithms for Discrete Optimization." Artificial Life 5, 3 (1999): 137-172.
- 31 DORIGO, M. MANIEZZO, V. COLORNI, A.. "The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents." Submitted to IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.
- 32 DREBORG, K.H.. "Essence of Backcasting." Futures (GB) 28, 9 (1996): 813-828.
- 33 EMEP/CORINAIR, 1996. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, first ed. The European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark.
- 34 Entec UK Limited, 2002. Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community. Study for the European Commission. Entec Uk Limited, Northwich, Cheshire, England, UK
- 35 FAIVRE D'ARCIER, B.. Prospective Pour un Financement Durable Des Transports Publics Urbains (Horizon 2015), PREDIT. Paris, 2008.
- 36 FAUDRY, D. CHANRON, J.J.. Etat Des Lieux de la Recherche Sur l'Innovation Dans Les Transports Terrestres, PREDIT-DRAST., Ministère de l'Équipement, des transports et du logement, du tourisme et de la mer. 2003.
- 37 Federal Highway Administration, ICF Consulting, HLB Decision Economics, Louis Berger Group. Freight Benefit/Cost Study (February 2001) National Cooperative Highway Research Program 342.
- 38 FLEMING, D.. Energy and the Common Purpose. Descending the Energy Staircase with Tradable Energy Quotas. London: The Lean Economy Connection, 2007.
- 39 FRANKHAUSER, S.. "The Economics of Adaptation.," EBRD. 2006.
- 40 FRANKHAUSER, S.. "The Costs of Adapting to Climate Change." GEF Working Paper Series, GEF Secretariat., Global Environment Facility. 1998.

- 41 FRANKHAUSER, S. TOL, S.I.J. & PEARCE, D.W.. "Equity and the Aggregation of Climate Change Damages." CSERGE Working Paper GEC 96-18, CSERGE.
- 42 GAVAZZA A.. "Leasing and Secondary Markets: Theory and Evidence from Commercial Aircraft." Ph.D (2nd Chapter) thesis, New York Univesity.
- 43 GEURS, K. van WEE, B.. "Backcasting as a Tool for Sustainable Transport Policy Making: the Environmentally Sustainable Transport Study in the Netherlands." EJTIR 4, 1 (2004): 47-69.
- 44 GEORGAKAKI, A. et al. "Transport and Environment Database System (TRENDS): Maritime air pollutant emission modelling » Atmospheric Environment 39 (2005) 2357–2365
- 45 GRINDER, J. BANDLER, R.. *Transe-Formations, Programmation Neuro-Linguistique et Techniques d'Hypnose éricksonienne*. Paris, France: InterEditions, 2005.
- 46 HALDEN, D. McGUIGAN, D. NISBET, A. McKINNON, A.. "Accesibiilty: Review of Measuring Techniques and Their Application.," Scottish Executive Central Research Unit., 2000.
- 47 HANDY, S.. "Accessibility vs. Mobility Enhancing Strategies for Addressing Automobile Dependence in the US." Prepared for the European Conference of Ministers of Transport, ECMT. 2002.
- 48 HICKMAN, R. & BANISTER, D.. "Looking Over the Horizon: Transport and Reduced CO₂ Emissions in the UK by 2030." *Transport Policy* 14, 2007 (2007): 377-387.
- 49 HOLMBERG, J. ROBERT, K-H.. "Backcasting from Non-Overlapping Sustainability Principles a Framework for Strategic Planning." *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 7: 291-308.
- 50 HOUEE, M. de JONG, G. JIANG, F.. "Modélisation du Choix Modal en Transport de Marchandises à Partir de la Combinaison de Données en Préférences Révélées et Déclarées.." *Notes de Syntheses du SES* Janvier-Février (2002).
- 51 HUMMELS, D.. "Transportation Costs and International Trade Over Time.,,".
- 52 HUMMELS, D.. "Toward a Geography of Trade Costs." Purdue University., September 2001.
- 53 HUMMELS, D.. "Time as a Trade Barrier.," Purdue University. July 2001.
- 54 HUMMELS, D. LUGOCKYY, V.. "Trade in Ideal Varieties: Theory and Evidence.,," November 2005.
- 55 HUMMELS, D. SKIBA, A.. "A Virtous Circle? Regional Tariff Liberalization and Scale Economies in Transport.," Purdue University. November 2002.

- 56 KIM, E. HEWINGS, G.. "An Application of Integrated Transport Network - Multiregional CGE Model II: Calibration of Network Effect on Highway." 42nd Southern Regional Science Association, Louisville, KY, April 2003.
- 57 LAKSHMANAN, T.R. & ANDERSON, W.P.. "Contextual Determinants of Transport Infrastructure Productivity: the Case for a New Modeling Strategy." International Conference on Measurement and Management of Infrastructure, JONKOPING, Sweden, JONKOPING International School of Business. October 2004.
- 58 LOMAX. T. TURNER. S. et al, NCHRP Report 398. "Quantifying Congestion Final Report." 1997.
- 59 LUND, H. MUNSTER, E.. "Integrated Transportation and Energy Sector CO₂ Emission Control Strategies." *Transport Policy* 13 (2006): 426-433.
- 60 MARINOVA, D. (editor). *The International Handbook On Environmental Technology Management*. Institute for Sustainability and Technology Policy, Murdoch University. Australia: Edward Elgar, 2007.
- 61 MASSIANI, J.. "Benefits of Travel Time Savings for Freight Transportations: Beyond the Costs." European Regional Science Association, August 2003.
- 62 MASSION, M.. Rapport d'Information. "Situation Des Ports Maritimes Français au Regard Des Ports du BENELUX." Rapport d'Information N° 295. Paris: COMMISSION DES FINANCES, DU CONTROLE BUDGETAIRE ET DES COMPTES ECONOMIQUES DE LA NATION, 1997/1998.
- 63 MATTIAS, H. & GORAN MATTSSON, L.. "Determinism and Backcasting in Future Studies." *Futures* 32 (2000): 613-634.
- 64 McKINNON A.. "Modifier la Gestion Logistique Des Entreprises." Seminaire International Comment Agir Sur Les Determinants de la Demande de Transport, Centre de recherche en logistique. Edimbourg, Ecosse, CEMT. 16 DECEMBRE 2002.
- 65 McKINNON, A. CAMPBELL, J.. "Opportunities for Consolidating Volume-Constrained Loads in Double-Deck and High-Cube Vehicles." Christian Salvesen Logistics Research Paper No. 1, Edinburgh, UK, Heriot Watt University. February 1997.
- 66 McKINNON, A.C.. "The Decoupling of Road Freight Transport and Economic Growth Trends in the UK: An Exploratory Analysis.," Edinburgh, UK, Logistics Research Centre/Heriot Watt University. October 2006. To be published as a paper in *Transport Reviews* in early 2007.
- 67 McKINNON, A.C.. "The Decoupling of Road Freight Transport and Economic Growth Trends in the UK: an Exploratory Analysis." *Transport Reviews* 27, 1 (2007): 37-64.

- 68 McKINNON, A.C.. " CO₂ Emissions from Freight Transport in the UK.," London, UK commission for integrated transport. 2007.
- 69 Ministère des Transport de l'équipement du tourisme et de la mer. "Instruction Cadre Relative Aux Méthodes d'évaluation économique Des Grands Projets d'Infrastructures de Transport.," Ministère des Transport de l'équipement du tourisme et de la mer. Paris, France, 25 mars 2004. mise à jour le 27 mai 2005.
- 70 MONMARCHE, N. SLIMANE, M. VENTURINI, G.. "L'Algorithme AntClass: Classification Non Supervisée Par Une Colonie de Fourmis Artificielles." *Apprentissage et évolution* (2001) 1, 2001: 131-166.
- 71 MUET, P.A.. *Théories et Modèles de la Macroéconomie*. Paris: Economica, 1992.
- 72 MULLER, P.A. & GAERTNER, N.. *Modélisation Objet Avec UML*. 2ème. Paris, France: Eyrolles, 2005.
- 73 Netherlands Economic Institute (coordinator). "REDEFINE Summary Report.," Transport RTD Programme., 15 February 1999. cordis.europa.eu/transport/src/redefinerep.htm.
- 74 NIVEAU, M.. *Histoire Des Faits économiques Contemporains*. CROZET, Y.. Paris: PUF, Novembre 2000.
- 75 OECD. "Society at a Glance." *OECD Social Indicators*, OECD. Paris, 2001.
- 76 ORTUZAR, J.D. WILLUMSEN, L.G.. *Modelling Transport*. 3rd. UK: Wiley, 2006.
- 77 O'Sullivan, A.. "Input-Output Analysis." Working Paper, October 2005.
- 78 PARENTE, S.L.. "The Failure of Endogenous Growth.," University of Illinois. Working paper.
- 79 PEARCE, D.. "The Role of Economic Valuation of Health Effects in UN/ECE LRTAP Work: History, Debate, Outstanding Issues." UK DETER/UN ECE Symposium on the Measurement and Economic Valuation of Health Effects of Air Pollution, Institute of Materials. London, 2001.
- 80 PIRIOU, J.P.. *La Comptabilité Nationale*. 14ème. Repères. Paris, France: La Découverte, 2005.
- 81 Queensland Government. "Policy Handbook.," Department of the Premier and Cabinet., 2006.
- 82 QUIST, J. & VERGRAGT, P.J.. "Backcasting for Industrial Transformations and System Innovations Towards Sustainability: Relevance for Governance?." *Governance for Industrial Transformations*. Proceedings of the 2003 Berlin Conference on the Human

- Dimensions of Global Environmental Change, Berlin, And Environmental Policy Research Center. 2004.
- 83 REGGIANI, A. NIJKAMP, P. SABELLA, E.. "Evolutionary Algorithms: Overview and Applications to European Transport." European Regional Science Association, Vienna, 1998.
- 84 REGGIANI, A. NIJKAMP, P. TSANG, W-F.. "Neural Network and Spatial Interaction Analysis of European Commodity Flows." Serie Research Mermoranda, vrije Universiteit. Amsterdam, 1997.
- 85 ROBERT M.. "Backcasting and Econometrics for Sustainable Planning. Information Technology and Individual Preferens of Travel." Journal of Cleaner Production 13, 2005: 841-851.
- 86 ROBITAILLE, M. & NGUYEN, T.. "Evaluation de la Congestion "De la Théorie à la Pratique"." Congrès Annuel de l'Association Des Transports du Canada, Association des Transports du Canada. Terre-Neuve et Labrador, 2003.
- 87 ROUCHAUD, D.. "L'Analyse Redefine Par Group de Produits." Notes de Synthèse du SES mars-avril (2000).
- 88 SCHAFER A. & VICTOR D.G.. "The Future Mobility of the World Populations." Transportation Research Part A, 34 (2000): 171-205.
- 89 SCHAFER, A.. "Long-Term Trends in Global Passenger Mobility." National Academy of Engineering Website, 2001, www.nae.edu/.
- 90 SCHAFER, A.. Transportation in a Climate-Constrained World. Cambridge Massachusetts: MIT Press, 2009.
- 91 SCHAFER, A. JACOBY, H.D.. "Technology Detail in a Multisector CGE Model: Transport Under Climate Policy." Energy Economics 27 (2005): 1-24.
- 92 SKOGSTAD, G.. "Policy Networks and Policy Communities. Conceptual Evolution and Governing Realities." Workshop on Canada's Contribution to Comparative Theorizing, Annual Meeting of the Canadian Political Science Association. London, Ontario, University of Western Ontario. June 2 2005. First Draft.
- 93 SMEETS, E. & WETERINGS, R.. "Environmental Indicators: Typology and Overview." Technical Report No 25, Copenhagen, European Environment Agency. 1999.
- 94 SPERLING, D., LUTSEY, N.. "Energy Efficiency in Passenger Transportation." The Bridge. National Academy of Engineering, Summer 2009.

- 95 STEEN, P. DREBORG, K.H. AKERMAN, J.. "Policy Scenarios for Sustainable Mobility in Europe-The POSSUM Project.," Environmental Strategies Research Group/FOA. Stockholm, POSSUM Consortium. 1998. Final Report submitted to EC DGVII.
- 96 STERN, N.. "Stern Review." The Economics of Climate Change, H.M. Treasury. 2006.
- 97 STEVENS, C.. "Measuring Sustainable Development." Statistics Brief, OECD., September 2005.
- 98 SYDSAETER, K. & HAMMOND, P.J.. *Matemáticas Para el Analisis Economico*. 1era. Spain: Prentice-Hall, 1998.
- 99 TEMPLE, BARKER & SLOANE, INC.. "Port Economic Impact Kit.," Washington, D.C., Maritime Administration. 1979.
- 100 The Bartlett School of Planning and Halcrow Group Ltd.. "Visioning and Backcasting for UK Transport Policy." VIBAT, DfT Horizons Research Programme., 2006.
- 101 TIEZZI, S.. "The Welfare Effects and the Distributive Impact of Carbon Taxation on Italian Households." *Energy Policy* 33, 2005 (2005): 1597-1612.
- 102 TILLEMA, T. VanWEE, B. ETTEMA, D.. "Road Pricing and (re)Location Decisions Households." ERSA Congress, Amsterdam, 2005.
- 103 TURNER, R.K. BROUWER, R. GEORGIU, S. BATEMAN, I.J.. "Ecosystem Functions and Services: An Integrated Framework and Case Study for Environmental Evaluation." CSERGE Working Paper GEC 2000-21, CSERGE. 2000.
- 104 VERNY, J.. "The Importance of Decoupling Between Freight Transport and Economic Growth." *EJTIR* 7, 2 (2007): 113-128.
- 105 Victoria Transport Institute. *Transportation Demand Management*. Online TDM Encyclopedia. Updated September 2007. <http://www.vtpi.org/tdm/index.php:2007>
- 106 WAELBROECH-ROCHA, E. et alli. *Le Financement du Système de Transport Terrestre à l'Horizon 2030, PREDIT*. Paris, Juillet 2008.
- 107 WHITEHEAD, T. PRESTON, J. & HOLVAD, T. "The Whole Life Impacts of Transport Charging Interventions on Business Performance: A Time Marching Framework." *Environment and Planning A*, 37 (2005): 877-894.
- 108 WILSON, C. TANSEY, J. LeRO, S.. "Integrating Backcasting & Decision Analytic Approaches to Policy Formulation: A Conceptual Framework." *The Integrated Assessment Journal* 6, 4 (2006): 143-164.
- 109 WONNACOTT, T.H. WONACOTT, R.J.. *Statistique*. 4ème. Paris, France: Economica, 1995.

- 110 ZAHAVI, Y.. "The UMOT Urban Interactions." DOT-RSPA-DPB, Washington, D.C., Department of Transportations. 1980.
- 111 ZAHAVI, Y. TALVITIE, A.. "Regularities in Travel Time and Money Expenditures." Transportation Research Records 750 (1980): 13-19.
- 112 ZAMPARINI, L. & REGGIANI, A.. "Freight Transport and the Value of Travel Time Savings: A Meta-Analysis of Empirical Studies." Transport Reviews 27, 5 (September 2007): 621-636.
- 113 ZIDI, S. MAOUCHE, S. HAMMADI, S.. "Ant Colony with Dynamic Local Search for the Time Scheduling of Transport Networks." International Journal of Computers, Communications & Control I, 4 (2006): 110-125.

Annexes

Annexe 1 : Consommations spécifiques et facteurs d'émissions de CO₂ des véhicules routiers

Facteurs d'émission moyens pour les VOITURES PARTICULIERES (COURTE DISTANCE)				
	IMPROVED PETROL	IMPROVED DIESEL	HYBRID Diesel	H2 FUEL CELLS-hybrid
CO2 (g/veh-km)	144	128	105	0
real consumption(l/100km)	6,12	4,75	3,92	3,05
average mass	720	840	770	790
system efficiency	0,277	0,312	0,379	0,556
real consumption(l/100km)	5,625	5,18	4,27	2,81
real consumption(l/100km carb.)	5,63	5,18	4,27	8,55

Facteurs d'émission moyens pour les VOITURES PARTICULIERES (LONGUE DISTANCE)				
	IMPROVED PETROL	IMPROVED DIESEL	HYBRID Diesel	H2 FUEL CELLS-hybrid
CO2 (g/veh-km)	134	119	98	0
real consumption(l/100km)	5,69	4,45	3,67	2,84
average mass	720	840	770	790
average max speed	166	166	166	166
system efficiency	0,277	0,312	0,379	0,556
real consumption(l/100km)	5,354	4,85	4,00	2,67
real consumption(l/100km carb.)	5,35	4,85	4,00	8,14

Facteurs d'émission moyens pour les VEHICULES UTILITAIRES LEGERS (COURTE DISTANCE)				
	IMPROVED PETROL	IMPROVED DIESEL	HYBRID Diesel	H2 FUEL CELLS
CO2 (g/veh-km)	176	125	94	0
real consumption(l/100km)	7,45	4,66	3,49	1,99
average mass in charge	1 030,00	1 700,00	1 700	1 700,00
average max speed	90,00	80,00	80	80,00
system efficiency	0,398	0,425	0,568	0,998
real consumption(l/100km ~pert.or ds)	5,373	5,34	4,00	2,28
real consumption(l or Nm3/100km carb.)	5,37	5,34	4,00	7,54

Facteurs d'émission moyens pour les VEHICULES UTILITAIRES LEGERS (LONGUE DISTANCE)			
	IMPROVED PETROL	IMPROVED DIESEL	H2 FUEL CELLS
CO2 (g/veh-km)	190	240	0
real consumption(l/100km)	8,08	8,93	3,52
average mass	1 060	1 700	1 700
average max speed	120	110	110
system efficiency	0,245	0,254	0,645
real consumption(l/100km)	8,078	8,93	3,52
real consumption(l/100km carb.)	8,08	8,93	11,68

Facteurs d'émission moyens pour les BUS (COURTE DISTANCE)			
	highway IMPROVED DIESEL	HYBRID DIESEL	H2 FUEL CELLS
CO2 (g/veh-km)	798	684	0
real consumption(l/100km~dsl)	29,71	25,48	23,78
system efficiency	0,40	0,47	0,50
real consumption(l/100km~dsl)	32,27	27,67	25,83
real consumption(l/100km carb.)	32,27	27,67	85,58

Facteurs d'émission moyens pour les BUS (LONGUE DISTANCE)			
	highway IMPROVED DIESEL	HYBRID DIESEL	H2 FUEL CELLS
CO2 (g/veh-km)	666	571	0
real consumption(l/100km~dsl)	24,80	21,27	19,85
system efficiency	0,40	0,47	0,50
real consumption(l/100km~dsl)	25,99	22,29	20,80
real consumption(l/100km carb.)	25,99	22,29	68,93

Facteurs d'émission moyens pour les POIDS LOURDS (COURTE DISTANCE)			
	highway IMPROVED DIESEL	HYBRID DIESEL	H2 FUEL CELLS
CO2 (g/veh-km)	784	640	0
real consumption(l/100km~dsl)	29,18	23,83	20,31
system efficiency	0,40	0,49	0,57
real consumption(l/100km~dsl)	22,83	18,64	15,89
real consumption(l/100km carb.)	22,83	18,64	52,64

Facteurs d'émission moyens pour les POIDS LOURDS (LONGUE DISTANCE)			
	highway IMPROVED DIESEL	HYBRID DIESEL	H2 FUEL CELLS
CO2 (g/veh-km)	733	599	0
real consumption(l/100km~dsl)	27,29	22,29	25,78
system efficiency	0,40	0,49	0,42
real consumption(l/100km~dsl)	20,82	17,01	19,67
real consumption(l/100km carb.)	20,82	17,01	65,17

Source: Rapport LET-ENERDATA (2008)

Annexes 2: Filières technologiques et facteurs d'émission indirecte

Emissions du système électrique

Production électrique (%)

	2000	2025	2050
Nucléaire, hydro, solaire, éolien	91,0%	81,6%	87,4%
Charbon sans capt-stockage CO2	3,6%	6,9%	7,5%
Charbon avec capt-stockage CO2			
Gaz sans capt-stockage CO2	3,9%	10,1%	3,7%
Gaz avec capt-stockage CO2			
Pétrole sans capt-stockage CO2	1,0%	0,5%	0,6%
Pétrole avec capt-stockage CO2			
Biomasse sans capt-stockage CO2	0,5%	0,9%	0,7%
Biomasse avec capt-stockage CO2			

Paramètres électriques

	2000	2025	2050
Taux de pertes T&D (%)			
Basse tension	15%	15%	15%
Ferroviaire	10%	10%	10%

Rendement des centrales thermiques (électricité nette produite / input combustibles; %)

Charbon sans capt-stockage CO2	40%	40%	40%
Charbon avec capt-stockage CO2	35%	35%	35%
Gaz sans capt-stockage CO2	50%	50%	50%
Gaz avec capt-stockage CO2	45%	45%	45%
Pétrole sans capt-stockage CO2	45%	45%	45%
Pétrole avec capt-stockage CO2	40%	40%	40%
Biomasse sans capt-stockage CO2	30%	30%	30%
Biomasse avec capt-stockage CO2	25%	25%	25%

Facteurs d'émission des combustibles utilisés pour les centrales thermiques

g/gep input	CO2	NOx	VOC
Charbon sans capt-stockage CO2	4,2		
Charbon avec capt-stockage CO2	0,4		
Gaz sans capt-stockage CO2	2,3		
Gaz avec capt-stockage CO2	0,2		
Pétrole sans capt-stockage CO2	3,3		
Pétrole avec capt-stockage CO2	0,3		
Biomasse sans capt-stockage CO2	0		
Biomasse avec capt-stockage CO2	-3,8		

33016

Facteurs d'émission de l'électricité de réseau

	2000	2025	2050
g/kwh			
CO2	54,3	105,3	1057,8
NOx	0	0	0
VOC	0	0	0
PM	0	0	0

Emissions du système carburants pétroliers

Production / consommation (%)

	2000	2025	2050
Essence	83%	83%	83%
Gazole	69%	69%	69%
GPL	49%	49%	49%
Carburéacteurs	68%	68%	68%
Soutes maritimes	24%	24%	24%

Production gazole (%)

Raffinerie, ex pétrole, sans CS	100%	90%	40%
Raffinerie, ex pétrole, avec CS		10%	20%
Gas To Liquids, sans CS			20%
Gas To Liquids, avec CS			10%
Coal To Liquids, sans CS			10%
Coal To Liquids, avec CS			

Paramètres production de carburants pétroliers

	2000	2025	2050
Pertes et autoconsommations raffineries ((tep primaire-tep final)/tep final; %)			
Sans CS	6,1%	6,1%	6,1%
Avec CS	9%	9%	9%
Pertes et autoconsommation GTL ((tep primaire-tep final)/tep final; %)			
Sans CS	20%	20%	20%
Avec CS	25%	25%	25%
Pertes et autoconsommation CTL ((tep primaire-tep final)/tep final; %)			
Sans CS	30%	30%	30%
Avec CS	35%	35%	35%

Facteurs d'émission des combustibles utilisés pour la production des carburants pétroliers

g/gep input	CO2	NOx	VOC
Raffineries sans CS	3,3		
Raffineries avec CS	0,3		
GTL sans CS	2,3		
GTL avec CS	0,2		
CTL sans CS	4,2		
CTL avec CS	0,4		

Emissions du système gaz

Composition gaz de réseau (% TWh)

	2000	2025	2050
Gaz naturel importé	91,1%	90%	80%
Gaz naturel extrait sans CS	3,9%	0%	
Gaz naturel extrait avec CS			
Bio-gaz		6%	10%
Coal-To-Gas (CTG) sans CS			8%
Coal-To-Gas (CTG) avec CS			
Autres gaz industriels sans CS	5,0%	4%	2%
Autres gaz industriels avec CS			

Paramètres système gaz

	2000	2025	2050
Rendement de la chaîne gazière sans CS (MJ final / MJ primaire; %)			
gaz naturel importé	100%	100%	100%
gaz naturel extrait	95%	95%	95%
biogaz	50%	50%	50%
Coal-To-Gas (CTG)	70%	70%	70%
Autres gaz industriels	70%	70%	70%
Rendement de la chaîne gazière avec CS (MJ final / MJ primaire; %)			
gaz naturel extrait	90%	90%	90%
Coal-To-Gas (CTG)	65%	65%	65%
Autres gaz industriels	65%	65%	65%

Facteurs d'émission des combustibles utilisés pour la production de gaz

g/gep input	CO2	NOx	VOC
gaz naturel importé	2,3		
gaz naturel extrait, sans CS	2,3		
gaz naturel extrait, avec CS	0,2		
biogaz	0		
CTG, sans CS	4,2		
CTG, avec CS	0,4		
Autres gaz industriels, sans CS	4,2		
Autres gaz industriels, avec CS	0,4		

Emissions de la production de biocarburants

Recours aux biocarburants (% du carburant en volume)			
	2000	2025	2050
Ethanol carburant / essence	0,2%		
ETBE / essence	1,5%	15%	30%
EMHV / gazole	2,3%	25%	38%
Autres biocarburants ex agriculture / gazole			
Fischer Tropsch biomasse ligneuse / gazole			
Autres production ex biomasse ligneuse / gazole			

Approvisionnement biocarburants (% en volume)			
	2000	2025	2050
Importations			
Production éthanol carburant sans CS	5%	0%	0%
Production éthanol carburant avec CS			
Production ETBE sans CS	38%	38%	44%
Production ETBE avec CS			
Production EMHV sans CS	58%	63%	56%
Production EMHV avec CS			
Autres production ex agriculture sans CS			
Autres production ex agriculture avec CS			
Fischer Tropsch biomasse ligneuse sans CS			
Fischer Tropsch biomasse ligneuse avec CS			
Autres production ex biomasse ligneuse sans CS			
Autres production ex biomasse ligneuse avec CS			

Paramètres production biocarburants			
	2000	2025	2050
Rendement de la chaîne sans CS (y compris culture et acheminement; MJ final / MJ primaire non rer)			
Production éthanol carburant	2	2	2
Production ETBE	1	1	1
Production EMHV	3	3	3
Autres production ex agriculture	1	1	1
Fischer Tropsch biomasse ligneuse	1	1	1
Autres production ex biomasse ligneuse	1	1	1
Rendement de la chaîne avec CS (y compris culture et acheminement; MJ final / MJ primaire non rer)			
Production éthanol carburant	2	2	2
Production ETBE	1	1	1
Production EMHV	3	3	3
Autres production ex agriculture	1	1	1
Fischer Tropsch biomasse ligneuse	1	1	1
Autres production ex biomasse ligneuse	1	1	1
Spécifications			
Ethanol carburant / essence	kg/l	PCI	
ETBE / essence	0,79	0,27	
EMHV / gazole	0,75	0,36	
Autres biocarburants ex agriculture / gazole	0,88	0,37	
Fischer Tropsch biomasse ligneuse / gazole			
Autres production ex biomasse ligneuse / gazole			

Facteurs d'émission des combustibles fossiles utilisés pour la production de bio-carburants

g/gep input non renouvelable	CO2	NOx	VOC
Production éthanol carburant, sans CS	3,3		
Production éthanol carburant, avec CS	0,3		
Production ETBE sans CS	3,3		
Production ETBE avec CS	0,3		
Production EMHV sans CS	3,3		
Production EMHV avec CS	0,3		
Autres production ex agriculture, sans CS	3,3		
Autres production ex agriculture, avec CS	0,3		
Fischer Tropsch biomasse ligneuse, sans CS	3,3		
Fischer Tropsch biomasse ligneuse, avec CS	0,3		
Autres production ex biomasse ligneuse, sans CS	3,3		
Autres production ex biomasse ligneuse, avec CS	0,3		

Source: Rapport LET-ENERDATA (2008)

Annexes 3: Consommations spécifiques des navires

Fuel consumption factors, Full power

Ship type	Average consumption (tonnes/day)	Consumption at full power (tonne/day as a function of gross tonnage (GT))
		A
Solid bulk	33,8	20,186
Liquid bulk	41,1	14,685
General cargo	21,3	9,8187
Container	65,9	8,0552
Passanger/ro-Ro/Cargo	32,3	13
Passanger	70,2	16,904
High speed ferry	80,4	39,483
Inland cargo	21,3	9,8197
Sail ships	3,4	0,4268
Tugs	14,4	5,6511
Fishing	5,5	1,9387
Other ships	26,4	9,7126
All ships	32,8	16,263

Source: EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2005

Annexes 4: Consommations spécifiques et facteurs d'émissions de CO₂ des avions

	Distance km	CLIMB/CRUISE/DESCENT	231,5	463	926	1389	1852	2778	3704
B737-100									
FUEL (KG)		FLIGHT TOTAL	1800	2495,3	3727,1	4949,7	6190,7	8721,8	11438
		LTO	919,7	919,7	919,7	919,7	919,7	919,7	919,7
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	880,3	1575,6	2807,4	4030	5271	7802,1	10518,3
NOX (KG)		FLIGHT TOTAL	17,9	24,4	34,3	43	52	69,8	90,8
		LTO	8	8	8	8	8	8	8
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	9,9	16,4	26,3	35	44	61,8	82,8
HC(g)		FLIGHT TOTAL	1532,2	2158,8	2877,3	3538	4164,6	5431	6843,4
		LTO	577,4	577,4	577,4	577,4	577,4	577,4	577,4
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	954,8	1581,4	2299,9	2960,6	3587,2	4853,6	6266
CO (g)		FLIGHT TOTAL	7420,3	9023,5	10474,7	11781,3	12957,8	15319,5	18033,9
		LTO	4816,8	4816,8	4816,8	4816,8	4816,8	4816,8	4816,8
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	2603,5	4206,7	5657,9	6964,5	8141	10502,7	13217,1
CO ₂		FLIGHT TOTAL	5670	7860,195	11740,365	15591,555	19500,705	27473,67	36029,7
		LTO	2897,055	2897,055	2897,055	2897,055	2897,055	2897,055	2897,055
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	2772,945	4963,14	8843,31	12694,5	16603,65	24576,615	33132,645
SO ₂		FLIGHT TOTAL	1,7604	2,4404034	3,6451038	4,8408066	6,0545046	8,5299204	11,186364
		LTO	0,8994666	0,8994666	0,8994666	0,8994666	0,8994666	0,8994666	0,8994666
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	0,8609334	1,5409368	2,7456372	3,94134	5,155038	7,6304538	10,2868974
	(nm)		125	250	500	750	1000	1500	2000
	Distance km	CLIMB/CRUISE/DESCENT	231,5	463	926	1389	1852	2778	3704
B737-400									
FUEL (KG)		FLIGHT TOTAL	1603,1	2268	3612,8	4960,3	6302,6	9187,7	12167,6
		LTO	825,4	825,4	825,4	825,4	825,4	825,4	825,4
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	777,7	1442,6	2787,4	4134,9	5477,2	8362,3	11342,2
NOX (KG)		FLIGHT TOTAL	17,7	23,6	36,9	48,7	60,2	86,3	114,4
		LTO	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	9,4	15,3	28,6	40,4	51,9	78	106,1
HC(g)		FLIGHT TOTAL	817,6	912,9	995,8	1065,2	1118,1	1240,4	1374,1
		LTO	666,8	666,8	666,8	666,8	666,8	666,8	666,8
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	150,8	246,1	329	398,4	451,3	573,6	707,3
CO (g)		FLIGHT TOTAL	14252,5	15836	17525,5	19060,6	20369,3	23298,2	26426,3
		LTO	11830,9	11830,9	11830,9	11830,9	11830,9	11830,9	11830,9
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	2421,6	4005,1	5694,6	7229,7	8538,4	11467,3	14595,4
CO ₂		FLIGHT TOTAL	5049,765	7144,2	11380,32	15624,945	19853,19	28941,255	38327,94
		LTO	2600,01	2600,01	2600,01	2600,01	2600,01	2600,01	2600,01
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	2449,755	4544,19	8780,31	13024,935	17253,18	26341,245	35727,93
SO ₂		FLIGHT TOTAL	1,5678318	0,8928162	0,9738924	1,0417656	1,0935018	1,2131112	1,3438698
		LTO	0,8072412	0,8072412	0,8072412	0,8072412	0,8072412	0,8072412	0,8072412
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	0,7605906	0,085575	0,1666512	0,2345244	0,2862606	0,40587	0,5366286
	(nm)		125	250	500	750	1000	1500	2000
	Distance km	CLIMB/CRUISE/DESCENT	231,5	463	926	1389	1852	2778	3704
ATR 72-200									
FUEL (KG)		FLIGHT TOTAL	351,6	567,3	998,6	1429,7	1860,7	2721,8	3581,3
		LTO	137	138,1	140,2	142,4	144,6	149	153,3
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	214,6	429,2	858,4	1287,3	1716,1	2572,8	3428
NOX (KG)		FLIGHT TOTAL	3,888	5,916	9,971	14,026	18,081	26,187	34,285
		LTO	1,452	1,469	1,503	1,537	1,571	1,64	1,708
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	2,436	4,447	8,468	12,489	16,51	24,547	32,577
HC(g)		FLIGHT TOTAL	0	0	0	0	0	0	0
		LTO	0	0	0	0	0	0	0
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	0	0	0	0	0	0	0
CO (g)		FLIGHT TOTAL	2145	3283,7	5560,1	7835	10108,3	14648,5	19176,9
		LTO	722,6	725	729,8	734,6	739,4	748,9	758,5
		CLIMB/CRUISE/DESCENT	1422,4	2558,7	4830,3	7100,4	9368,9	13899,6	18418,4
CO ₂		FLIGHT TOTAL	1107,54	1786,995	3145,59	4503,555	5861,205	8573,67	11281,095
		LTO	431,55	435,015	441,63	448,56	455,49	469,35	482,895

	Distance km	CLIMB/CRUISE/DESCENT	231,5	463	926	1389	1852	2778	3704	4630
B-767										
FUEL (KG)	FLIGHT TOTAL		3030,3	4305,2	6485,2	8665,1	10845,1	15408,6	20086,6	24804,4
	LTO		1617,1	1617,1	1617,1	1617,1	1617,1	1617,1	1617,1	1617,1
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		1413,2	2688,1	4868,1	7048	9228	13791,5	18469,5	23187,3
NOX (KG)	FLIGHT TOTAL		52	74	103,5	129,4	155,6	213	273,1	320,3
	LTO		26	26	26	26	26	26	26	26
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		26	48	77,5	103,4	129,6	187	247,1	294,3
HC(g)	FLIGHT TOTAL		1123,9	1434,5	2550,4	3666,2	4782,1	7094,4	9474,4	12109
	LTO		881	881	881	881	881	881	881	881
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		242,9	553,5	1669,4	2785,2	3901,1	6213,4	8593,4	11228
CO (g)	FLIGHT TOTAL		9710,3	12531,4	15362,5	17537,8	19713,1	24229,9	28869,2	33258,5
	LTO		6077,3	6077,3	6077,3	6077,3	6077,3	6077,3	6077,3	6077,3
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		3633	6454,1	9285,2	11460,5	13635,8	18152,6	22791,9	27181,2
CO2	FLIGHT TOTAL		9545,445	13561,38	20428,38	27295,065	34162,065	48537,09	63272,79	78133,86
	LTO		5093,865	5093,865	5093,865	5093,865	5093,865	5093,865	5093,865	5093,865
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		4451,58	8467,515	15334,515	22201,2	29068,2	43443,225	58178,925	73039,995
SO2	FLIGHT TOTAL		2,9636334	4,2104856	6,3425256	8,4744678	10,6065078	15,0696108	19,6446948	24,2587032
	LTO		1,5815238	1,5815238	1,5815238	1,5815238	1,5815238	1,5815238	1,5815238	1,5815238
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		1,3821096	2,6289618	4,7610018	6,892944	9,024984	13,488007	18,063171	22,6771794
	(nm)		125	250	500	750	1000	1500	2000	2500
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		231,5	463	926	1389	1852	2778	3704	4630
DC-10										
FUEL (KG)	FLIGHT TOTAL		4727,7	6804,4	10487,5	14170,5	17853,6	25476,2	33218,6	41492,3
	LTO		2381,2	2381,2	2381,2	2381,2	2381,2	2381,2	2381,2	2381,2
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		2346,5	4423,2	8106,3	11789,3	15472,4	23095	30837,4	39111,1
NOX (KG)	FLIGHT TOTAL		97,8	133,8	205,4	265,8	327,3	457,6	588,6	718,1
	LTO		41,7							
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		56,1	133,8	205,4	265,8	327,3	457,6	588,6	
HC(g)	FLIGHT TOTAL		34368,1	43406,9	46147,9	48105,2	50062,4	54078,8	54353,6	58275,1
	LTO		22835,1	22835,1	22835,1	22835,1	22835,1	22835,1	22835,1	22835,1
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		11533	20571,8	23312,8	25270,1	27227,3	31243,7	31518,5	35440
CO (g)	FLIGHT TOTAL		71545	80256,7	84288,5	86833,5	89478,4	94847,8	99309,2	104973,1
	LTO		61625	61625	61625	61625	61625	61625	61625	61625
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		9920	18631,7	22663,5	25208,5	27853,4	33222,8	37684,2	43348,1
CO2	FLIGHT TOTAL		14892,255	21433,86	33035,625	44637,075	56238,84	80250,03	104638,59	130700,745
	LTO		7500,78	7500,78	7500,78	7500,78	7500,78	7500,78	7500,78	7500,78
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		7391,475	13933,08	25534,845	37136,295	48738,06	72749,25	97137,81	123199,965
SO2	FLIGHT TOTAL		4,6236906	6,6547032	10,256775	13,858749	17,4608208	24,9157236	32,4877908	40,5794694
	LTO		2,3288136	2,3288136	2,3288136	2,3288136	2,3288136	2,3288136	2,3288136	2,3288136
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		2,294877	4,3258896	7,9279614	11,5299354	15,1320072	22,58691	30,1589772	38,2506558
	(nm)		125	250	500	750	1000	1500	2000	2500
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		231,5	463	926	1389	1852	2778	3704	4630
B747-400										
FUEL (KG)	FLIGHT TOTAL		6330,9	9058,3	13404,6	17750,9	22097,2	30921,6	40266,7	49480,2
	LTO		3402,2	3402,2	3402,2	3402,2	3402,2	3402,2	3402,2	3402,2
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		2928,7	5656,1	10002,4	14348,7	18695	27519,4	36864,5	46078
NOX (KG)	FLIGHT TOTAL		118,7	168	226,9	280,9	335,6	447,1	574	687,4
	LTO		56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6	56,6
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		62,1	111,4	170,3	224,3	279	390,5	517,4	630,8
HC(g)	FLIGHT TOTAL		5873,2	9346,5	11166,2	11834,8	12503,3	13898	15321,1	16119,7
	LTO		1849,5	1849,5	1849,5	1849,5	1849,5	1849,5	1849,5	1849,5
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		4023,7	7497	9316,7	9985,3	10653,8	12048,5	13471,6	14270,2
CO (g)	FLIGHT TOTAL		31566,9	41952,9	47670,9	50789,3	53907,6	60238,3	66939,4	71469
	LTO		19497,2	19497,2	19497,2	19497,2	19497,2	19497,2	19497,2	19497,2
	CLIMB/CRUISE/DESCENT		12069,7	22455,7	28173,7	31292,1	34410,4	40741,1	47442,2	51971,8
CO2	FLIGHT TOTAL		19942,335	28533,645	42224,49	55915,335	69606,18	97403,04	126840,105	155862,63
	LTO		10716,93	10716,93	10716,93	10716,93	10716,93	10716,93	10716,93	10716,93

Source: EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 2005

Index des Figures, Tables et Equations

Figure 1 Cycle des politiques publiques	23
Figure 2 Diagramme de construction des scénarios.....	24
Figure 3 Diagramme du modèle TILT	28
Figure 4 Diagramme simplifié du module BASES de VLEEM (modifié par l'auteur) présenté dans le rapport final VLEEM 2 du Consortium VLEEM.	29
Figure 5 Diagramme du module macroéconomie du modèle TILT.....	32
Figure 6 Diagramme du module Transports	54
Figure 7 Diagramme du module microcomportements.....	59
Figure 9 Logique du transport des marchandises.....	67
Figure 10 Structure des politiques publiques	77
Figure 11 Prise d'écran de contrôle du module des politiques publiques.....	81
Figure 12 Diagramme du Module Politiques Publiques	84
Figure 15 Capture du sous-module de dynamique des parcs	91
Figure 16 Capture du module d'allocation des Vkm	94
Figure 17 Capture du récapitulatif du module émissions 1.....	95
Figure 18 Capture du récapitulatif du module émissions 2.....	95
Figure 19 Capture du module émissions	96
Figure 20 Capture du module émissions-maritime	100
Figure 21 Structure opérationnelle de TILT	110
Figure 23 TKM/ Tmachines et produits manufacturés	117
Figure 24 TKM/T pondéreux	118
Figure 25 Consommation de pondéreux	119
Figure 26 Consommation d'équipement, machines en produits manufacturés	120
Figure 27 GTKM d'équipement, machines en produits manufacturés.....	121
Figure 28 Distribution du budget des ménages et répartition modale.....	122
Figure 29 Trafic par type -passagers et marchandises-	131
Figure 30 Trafic par zone -passagers et marchandises.....	131
Figure 31 Emissions par type -passagers et marchandises-	136
Figure 32 Emissions par zone -passagers et marchandises	137
Figure 33 Impact économique par secteur	138
Figure 34 Distribution du budget transport des ménages, répartition modale et besoins en investissement	139
Figure 35 Analyse multicritère du poids des politiques publiques	140
Figure 36 Trafic par type -passagers et marchandises	151
Figure 37 Trafic par zone -passagers et marchandises-	153
Figure 38 Emissions par type -passagers et marchandises-	156
Figure 39 Emissions par zone -passagers et marchandises.....	157
Figure 40 Distribution du budget transport des ménages, répartition modale et besoins en investissement	157
Figure 41 Analyse multicritère du poids des politiques publiques	159
Figure 42 Impact économique par secteur	161
Figure 43 Trafic par type -passagers et marchandises-	170
Figure 44 Trafic par zone -passagers et marchandises-	171
Figure 45 Emissions par type -passagers et marchandises-	174
Figure 46 Emissions par zone -passagers et marchandises.....	176
Figure 47 Distribution du budget transport des ménages, répartition modale et besoins en investissement	177
Figure 48 Analyse multicritère du poids des politiques publiques	179
Figure 49 Impact économique par secteur	181

Tableau 1 Evolution des routes et autoroutes.....	113
Tableau 2 Evolution du parc véhiculaire et kilométrage.....	114
Tableau 3 Temps passé dans les transports par jour et par passager (en min/voy.j).....	114
Tableau 4 Décomposition par effet du TCAM du temps total passé dans les transports par jour et par passager	115
Tableau 5 Temps total passé dans les transports pour les marchandises (en Gt.h).....	115
Tableau 6 Décomposition par effet du TCAM du temps total passé dans les transports pour les marchandises	115
Tableau 8 Dépenses de fonctionnement et investissements.....	123
Tableau 9 Hypothèses du scénario	128
Tableau 10 Répartition du trafic passagers et marchandises.....	130
Tableau 11 Répartition du trafic international –marchandises.....	132
Tableau 12 Emissions de CO ₂ pour les passagers et les marchandises.....	134
Tableau 13 Emissions pour le trafic international -marchandises-	135
Tableau 14 Poids des politiques publiques et sentier des politiques publiques	141
Tableau 15 Besoins en investissement par type d'infrastructure.....	141
Tableau 16 Taux de croissance par secteur.....	143
Tableau 17 Hypothèses du scénario	148
Tableau 18 Répartition du trafic passagers et marchandises.....	150
Tableau 19 Répartition du trafic international –marchandises.....	151
Tableau 20 Emissions de CO ₂ pour les passagers et les marchandises.....	154
Tableau 21 Emissions pour le trafic international -marchandises-	155
Tableau 22 Besoins en investissement par type d'infrastructure.....	159
Tableau 23 Poids des politiques publiques et sentier des politiques publiques	160
Tableau 24 Taux de croissance par secteur.....	162
Tableau 25 Hypothèses du scénario	167
Tableau 26 Répartition du trafic passagers et marchandises.....	168
Tableau 27 Répartition du trafic international -marchandises-	169
Tableau 28 Emissions de CO ₂ pour les passagers et les marchandises.....	173
Tableau 29 Emissions pour le trafic international -marchandises-	175
Tableau 30 Besoins en investissement par type d'infrastructure.....	178
Tableau 31 Poids des politiques publiques et sentier des politiques publiques	180
Tableau 32 Taux de croissance par secteur.....	182

Équation 1	50
Équation 2	50
Équation 3	51
Équation 4	53
Équation 5	53
Équation 6	53
Équation 7	54
Équation 8	58
Équation 9	58
Équation 10	58
Équation 11	58
Équation 12	65
Équation 13	65
Équation 14	66
Équation 15	66
Équation 16	83