HAL
open science

Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ? Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Rapport final

Yves Crozet, Hector G. Lopez-Ruiz, Bertrand Chateau, Vincent Bagard

To cite this version:

Yves Crozet, Hector G. Lopez-Ruiz, Bertrand Chateau, Vincent Bagard. Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ? Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Rapport final. 2008. halshs-00293725

HAL Id: halshs-00293725

https://shs.hal.science/halshs-00293725v1

Submitted on 7 Jul 2008

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.

PREDIT 3/ Groupe 11: "Politique des transports"

Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable: comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ?

Convention n°05 03C 0038

Rapport final

30 Avril 2008

Cette publication s'inscrit dans le cadre du programme de recherche PREDIT 3. Cette étude est issue d'un travail en commun entre Enerdata et le Laboratoire d'Economie des Transports d'une part, des réflexions d'un groupe de travail constitué au sein du Groupe Opérationnel 11 du PREDIT d'autre part.

Auteurs

Enerdata : Bertrand Château (direction), Vincent Bagard (chargé d'études).
Laboratoire d'Economie des Transports : Yves Crozet (direction), Hector G. Lopez-Ruiz (doctorant).

Le PREDIT est un programme de recherche, d'expérimentation et d'innovation sur les transports terrestres créé à l'initiative des ministères chargés des Transports, de la Recherche, de l'Environnement, de l'Industrie avec le soutien de l'Ademe. Il met en œuvre des programmes de recherche et encourage des projets dans le domaine des transports publics ou privés de voyageurs ou de marchandises, assurant par des modes de transport routiers ou ferroviaires, des déplacements en milieu urbain ou interurbain.

ENERDATA
2, Avenue de Vignate
F-38610 Gières

Tél : +33 (0)4 76 42 25 46
Fax : +33 (0)4 76 51 61 45
http://www.enerdata.fr

Laboratoire d'Economie des Transports
Institut des Sciences de l'Homme
14, Avenue Berthelot
F-69363 Lyon Cedex 07

Tél : +33 (0)4 72 72 64 03
Fax : +33 (0)4 72 72 64 48
http://www.let.fr/

Sommaire

1 Introduction générale 14

1.1 Contexte général de la recherche 14

1.1.1. L'irruption du « facteur 4 » dans les politiques publiques 14

1.1.2. Les transports, entre contrainte pétrolière et contrainte climatique 15

1.2 Fondements et objectifs de la recherche 16

1.2.1. Une démarche « back-casting, fondées sur les prévisions du CGPC 16

1.2.2. Une représentation systémique pour garantir la cohérence des scénarios 17

1.2.3. TILT (Transport Issues in the Long Term), un modèle analytique pour quantifier les scénarios 19

1.2.4. Structure de la recherche et du rapport final 19

2 Partie 1 : TILT, un modèle pour quantifier les scénarios de mobilité durable 21

2.1 Introduction 23

2.2 Du modèle VLEEM au modèle TILT 25

2.2.1. Mise en cohérence des éléments de contexte : l'héritage de VLEEM 25

2.2.1.1 Module "Démographie" 26

2.2.1.2 Module "information/éducation" 26

2.2.1.3 Module "activité" 27

2.2.1.4 Module "budget temps" 27

2.2.1.5 Module "production de richesses" 28

2.2.2. Transports de passagers : mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de mobilité 28

2.2.2.1 Besoins de services énergétiques pour les passagers dans le modèle VLEEM 29

2.2.2.2 Mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de transport dans TILT 30

2.2.3. Transports de marchandises : mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de transport 33

2.2.3.1 Besoins de services énergétiques pour les marchandises dans le modèle VLEEM 33

2.2.3.2 Retour sur la dynamique des transports de marchandises 34

2.2.3.3 Mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de transport dans TILT 40

2.2.4. La quantification des scénarios de mobilité durable avec TILT 41

2.2.5. Module de simulation des parcs et de pénétration des nouvelles technologies 42

2.2.6. Module d'allocation des veh-km par classe d'âge des engins de transport et par technologie 46

2.2.7. Module de calcul des consommations d'énergie et des émissions de CO2 48

3 Partie 2 : Définir et quantifier les scénarios de mobilité durable 51

3.1 Partir d'un scénario « tendanciel » 53

3.1.1. Quel sens donner à un scénario tendanciel 53

3.1.2. Les éléments du contexte macro-économique et démographique 54

3.1.3. Trafics globaux de passagers, structures modales et structures de services de mobilité dans une vision tendancielle 54
3.1.3.1 Trafics globaux passagers. 54
3.1.3.2 Les évolutions tendancielles des structures modales 55
3.1.3.3 Les hypothèses de décroissance des vitesses automobiles 56
3.1.3.4 Paramètres additionnels pris en compte par TILT 57
3.1.3.5 Les éclairages de TILT sur le scénario de référence 58
3.1.4. Trafics globaux des marchandises, structures modales et structures de services de transport dans le scénario tendanciel 59
3.1.4.1 Tendances sur la distribution spatiale de la production 59
3.1.4.2 Trafics globaux marchandises 59
3.1.4.3 Répartition modale du trafic marchandises tendanciel 59
3.1.4.4 Spécifications des modes maritime et aérien. 60

3.2 Du scénario « tendanciel » aux scénarios de mobilité durable 60
3.2.1. La trame générale des scénarios 62
3.2.1.1 Mobilité des personnes et des marchandises : la montée des contraintes 63
3.2.1.2 Contraintes sur la mobilité : ouvrir le champ des possibles 65
3.2.1.3 La mythologie : un puissant levier pour la prospective 66
3.2.2. Les arguments des scénarios de mobilité durable 67
3.2.2.1 Famille de scénarios n°1 : Pégase 67
3.2.2.2 Famille de scénarios n°2 : Chronos 69
3.2.2.3 Famille de scénarios n°3 : Hestia 70
3.2.3. La prise en compte des politiques publiques dans les scénarios 73
3.2.3.1 Le rôle des politiques publiques dans les scénarios 73
3.2.3.2 Problématique générale de l'évaluation des politiques publiques dans les scénarios de rupture 74
3.2.3.3 Caractériser les politiques publiques 76
3.2.3.4 L'impact des mesures sur l'activité économique : qui perd, qui gagne ? 76
3.2.3.5 L'impact des mesures sur les prix et les coûts du transport 77
3.2.3.6 L'impact des mesures sur l'atteinte des objectifs de durabilité 78
3.2.3.7 Synthèse 78

4 Partie 3: Scénarios de mobilité durable et politiques publiques 79

4.1 Pégase : toujours plus de mobilité ? 81
4.1.1. Les fils directeurs de la famille de scénarios Pégase 81
4.1.1.1 Rappel sur les contraintes, variables et indicateurs de mobilité des scénarios Pégase 81
4.1.1.2 Du scénario du CGPC au scénario Pégase : mise en lumière des grandes tendances pour les marchandises 82
4.1.2. Les trafics voyageurs et les émissions de CO2 dans Pégase 84
4.1.2.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Pégase 84
4.1.2.2 Les projections de trafics dans les scénarios Pégase 87
4.1.2.3 Définition des paquets technologiques 91
4.1.2.4 Les projections d'émissions directes dans les scénarios Pégase 94
4.1.3. Les trafics de marchandises et les émissions de CO2 dans Pégase 99
4.1.3.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Pégase 99
4.1.3.2 La projection des trafics dans les scénarios Pégase 101
4.1.3.3 Emissions de CO2 et facteur 4 pour les marchandises dans les scénarios Pégase 104
4.1.4. Comment vit-on dans Pégase en 2050 ? 108

4.1.4.1. Petites histoires de passagers…. 108
4.1.4.2 Comment transporte-t-on les marchandises ? 109
4.1.5. Les enseignements de Pégase pour le facteur 4 et les politiques publiques... 112
4.1.5.1 La mobilité durable dans les scénarios Pégase 112
4.1.5.2 Quelles politiques publiques dans Pégase ? 119
4.1.5.3 Qui perd, qui gagne dans les scénarios Pégase ? 120
4.1.5.4 Comment évoluent les prix et les coûts du transport dans les scénarios Pégase ? 121
4.1.5.5 Synthèse de l'évaluation des politiques publiques au regard de la mobilité durable dans les scénarios Pégase 122

4.2 Chronos : quand le temps devient la ressource la plus rare…. 124
4.2.1. Les fils directeurs des scénarios de la famille Chronos 124
4.2.1.1 Rappel des contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénarios Chronos 124
4.2.1.2 Passagers: La congestion routière et le développement des modes à grande vitesse poussent à une dérive des budgets temps de transport 125
4.2.1.3 Les marchandises : le stimulus des prix et le ralentissement de la route poussent à modifier l'approche logistique 126
4.2.2. Les trafics de passagers et les émissions de CO2 dans Chronos 129
4.2.2.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Chronos 129
4.2.2.2 Les projections de trafics dans les scénarios Chronos 131
4.2.2.3 Les projections d'émissions directes de CO2 dans les scénarios Chronos, transport de passagers 134
4.2.3. Les trafics de marchandises et les émissions de CO2 dans Chronos 136
4.2.3.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Chronos 136
4.2.3.2 Les projections des trafics et des émissions de GES dans les scénarios Chronos 138
4.2.3.3 Les émissions de GES et le facteur 4 pour les marchandises dans les scénarios Chronos 141
4.2.4. Comment vit-on dans Chronos en 2050 ? 145
4.2.4.1 Petites histoires de passagers…. 145
4.2.4.2 Comment transporte-t-on les marchandises ? 148
4.2.5. Les enseignements de Chronos pour le facteur 4 et les politiques publiques 151
4.2.5.1 La mobilité durable dans les scénarios Chronos 151
4.2.5.2 Quelles politiques publiques dans Chronos ? 159
4.2.5.3 Qui perd, qui gagne dans les scénarios Chronos ? 161
4.2.5.4 Comment évoluent les prix et les coûts du transport dans les scénarios Chronos ? 162
4.2.5.5 Synthèse de l'évaluation des politiques publiques au regard de la mobilité durable dans les scénarios Chronos 165

4.3 Hestia : La redécouverte, choisie ou contrainte, de la proximité 167
4.3.1. Fils directeurs des scénarios de la famille Hestia 167
4.3.1.1 Rappel des contraintes, variables et indicateurs de mobilité des scénarios Hestia 167
4.3.1.2 Hestia : repenser la ville et les loisirs pour épargner le temps 168
4.3.1.3 Repenser l'organisation de la production et les localisations pour minimiser les temps d'acheminement avec des vitesses contraintes 169
4.3.2. Les trafics voyageurs et les émissions de CO2 dans Hestia 171
4.3.2.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Hestia 171

4.3.2.2 Les projections de trafics dans les scénarios Hestia 173
4.3.2.3 Les projections d'émissions directes de CO2 dans les scénarios Hestia, transport de passagers 176
4.3.3. Les trafics marchandises et les émissions de CO2 dans Hestia 178
4.3.3.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Hestia 179
4.3.3.2 Les projections des trafics de marchandises dans les scénarios Hestia..... 182
4.3.3.3 La technologie, les émissions de CO2 et le facteur 4 pour le transport de marchandises dans les scénarios Hestia 184
4.3.4. Comment vit-on dans Hestia en 2050 ? 188
4.3.4.1 Petites histoires de passagers…..... 188
4.3.4.2 Comment déplace-t-on les marchandises dans Hestia ?..... 190
4.3.5. Les enseignements de Hestia pour le facteur 4 et les politiques publiques.... 193
4.3.5.1 La mobilité durable dans les scénarios Hestia 193
4.3.5.2 Quelles politiques publiques dans Hestia ?..... 197
4.3.5.3 Qui perd, qui gagne dans les scénarios Hestia ? 200
4.3.5.4 Comment évoluent les prix et les coûts du transport dans les scénarios Hestia ? 203
4.3.5.5 Synthèse de l'évaluation des politiques publiques au regard de la mobilité durable dans les scénarios Hestia 205

4.4 Comparaison synoptique des scénarios 206

5 Conclusion générale : Mobilité durable et politiques publiques, les enseignements des scénarios..... 213

5.1 Comprendre les tendances émergentes 213
5.1.1 Mobilité : par petites touches, un paysage profondément transformé..... 214
5.1.2 Les politiques publiques et le coût généralisé : des pratiques différenciées 216

5.2 De l'accompagnement des inflexions à l'anticipation des ruptures 219
5.2.1 De la consommation d'espace aux contraintes climatiques : affirmer la nouvelle donne des politiques publiques 219
5.2.2 Les risques climatiques et les autres : préparer les ruptures 222

6 Annexe 1 : Consommations spécifiques et facteurs d'émissions de CO2 des véhicules routiers..... 229

7 Annexes 2: Filières technologiques et facteurs d'émission indirecte..... 231

Liste des figures

Figure 1 : Les principaux déterminants de la mobilité et de ses impacts environnementaux 18
Figure 2 : Structure générale du modèle TILT 25
Figure 3 : Schéma fonctionnel simplifié de VLEEM 26
Figure 4 : Exemple de calcul des vitesses et mobilité par mode dans VLEEM 30
Figure 5 : Exemple de mise en cohérence des vitesses et usages VP dans TILT 31
Figure 6 : Exemple de mise en cohérence des vitesses et parts modales pour la longue distance dans TILT 32
Figure 7 : Exemple de calcul des vitesses et trafics par mode dans VLEEM 34
Figure 8 : Exemple de mise en cohérence des vitesses et parts modales pour les marchandises longue distance dans TILT 41
Figure 9 : courbe standard de survie des véhicules 43
Figure 10 : courbe standard de pénétration d'une nouvelle technologie 43
Figure 11 : Exemple du sous-module de dynamique des parcs 44
Figure 12 : Exemple de distribution des parcs VP par technologie 45
Figure 13 : Exemple de module d'allocation des véh-km VP 46
Figure 14 : Capture du module d'allocation de mouvements maritimes 48
Figure 15 : Exemple de récapitulatif du module émissions directes 49
Figure 16 : Evolution des distances parcourues en km par personne et par jour depuis 1800 aux Etats-Unis 62
Figure 17 : Le cadre général de positionnement des scénarios 65
Figure 18 : La logique d'emboîtement des trois familles de scénarios. 72
Figure 19 : Les vitesses modales du transport de passagers dans Pégase 87
Figure 20 : Les trafics de passagers dans Pégase 87
Figure 21 : Les structures modales du transport urbain de passagers dans Pégase 89
Figure 22 : Les structures modales du transport régional de passagers dans Pégase 89
Figure 23 : Les structure modales du transport longue distance de passagers dans Pégase 91
Figure 24 : Paquets technologiques 1 et 2 : exemple de pénétration 92
Figure 25 : Le recours à l'électricité pour les hybrides rechargeables bi-énergie 93
Figure 26 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquet technologique 1 95
Figure 27 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquet technologique 2.1 96
Figure 28 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquets technologiques 2.2 à 2.4 97
Figure 29 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquet 2.4 98
Figure 30 : Trafics par modes dans le scénario Pégase 101
Figure 31 : Trafics marchandises dans Pégase 102
Figure 32 : Emissions de CO2 du transport de marchandises dans Pégase 105
Figure 33 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 1 113
Figure 34 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-1 114
Figure 35 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-2 114
Figure 36 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-3 115
Figure 37 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-4 115
Figure 38 : Ensemble des émissions directes et indirectes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-4 116
Figure 39 : Comment atteindre le facteur 4 pour les transports dans Pégase ? 118
Figure 40 : Les vitesses des passagers dans Chronos 131
Figure 41 : Les trafics de passagers dans Chronos 131
Figure 42 : La structure modale des trafics urbains de passagers dans Chronos 132
Figure 43 : La structure modale des trafics régionaux de passagers dans Chronos 133
Figure 44 : La structure modale des trafics longue distance de passagers dans Chronos 133
Figure 45 : Les émissions de CO2 du transport de passagers dans Chronos 134
Figure 46 : Les émissions de CO2 du transport de passagers par catégorie de services dans Chronos 136
Figure 47 : Trafic Marchandises 2025 dans Chronos 139
Figure 48 : Trafic Marchandises 2050 dans Chronos 139
Figure 49 : Trafic et zone par mode- Marchandises 140
Figure 50 : Emissions de CO2 du transport de marchandises dans Chronos 142
Figure 51 : Emissions de CO2 du transport international de marchandises dans Chronos 144
Figure 52 : Emissions directes de CO2 de l'ensemble du transport dans Chronos 152
Figure 53 : Emissions directes et indirectes de CO2 de l'ensemble du transport dans Chronos 154
Figure 54 : Arbitrages fret/passagers pour atteindre le facteur 4 dans Chronos avion 156
Figure 55 : Arbitrages fret / passagers par service de mobilité pour atteindre le facteur 4 dans Chronos 157

Figure 56 : Impact sur l'utilisation de la VP des arbitrages fret / passagers pour atteindre le facteur 4 dans Chronos 159
Figure 57 : Les vitesses de déplacement des passagers dans Hestia 173
Figure 58 : Les trafics passagers par mode dans Hestia 174
Figure 59 : Les trafics urbains de passagers par mode dans Hestia 175
Figure 60 : Les trafics régionaux de passagers par mode dans Hestia 175
Figure 61 : Les trafics régionaux de passagers par mode dans Hestia 176
Figure 62 : Les émissions de CO2 du transport de passagers dans Hestia 176
Figure 63 : Les émissions de CO2 du transport de passagers par catégorie de services dans Hestia 178
Figure 64 : Trafic Marchandises dans Hestia 182
Figure 65 : Trafic des marchandises par mode et zone dans Hestia 183
Figure 66 : Les émissions de CO2 du transport de marchandises dans Hestia 185
Figure 67 : Les émissions de CO2 du transport international de marchandises dans Hestia 187
Figure 68 : Les émissions directes de CO2 du transport dans Hestia 194
Figure 69 : Les émissions directes et indirectes de CO2 du transport de marchandises dans Hestia 196

Liste des tableaux

Tableau 1 : Eléments de contexte 54
Tableau 2 : Trafics passagers en 2050 dans le scénario S1 du CGPC 55
Tableau 3 : Trafics et parts de l'aérien en 2050 dans le scénario tendanciel 56
Tableau 4 : Vitesses des déplacements passagers dans le scénario tendanciel 56
Tableau 5 : Variables et indicateurs de mobilité : scénarios Pégase 67
Tableau 6 : Contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénarios Chronos 69
Tableau 7 : Contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénarios Hestia 70
Tableau 8 : Système de pondération des acteurs 77
Tableau 9 : Système de pondération des catégories de prix et coûts 77
Tableau 10 : Objectifs catégoriels du facteur 4 78
Tableau 11 : Hypothèses utilisées dans le scénario Pégase marchandises 100
Tableau 12 : Trafics marchandises intérieurs par catégorie de services dans Pégase 103
Tableau 13 : Trafics marchandises internationaux par catégorie de services dans Pégase 104
Tableau 14 : Emissions de CO2 internationales par catégorie de services dans Pégase 107
Tableau 15 : Mesures phares des politiques publiques dans les scénarios Pégase 120
Tableau 16 : Qui perd, qui gagne, dans Pégase 121
Tableau 17 : Quelles évolutions des coûts de transport dans Pégase 122
Tableau 18 : Synthèse des impacts des politiques publiques dans Pégase 123
Tableau 19 : Hypothèses utilisées dans le scénario Chronos, trafic marchandises intérieur 138
Tableau 20 : Hypothèses utilisées dans le scénario Chronos, trafic marchandises international 138
Tableau 21 : Trafic Intérieur 140
Tableau 22 : Trafic International 141
Tableau 23 : Mesures phares des politiques publiques dans les scénarios Chronos 160
Tableau 24 : Qui perd, qui gagne, dans Chronos 162
Tableau 25 : Quelles évolutions des coûts de transport dans Chronos 164
Tableau 26 : Synthèse des impacts des politiques publiques dans Chronos 165
Tableau 27 : Hypothèses utilisées dans le scénario Hestia, transport intérieur de marchandises 181
Tableau 28 : Hypothèses utilisées dans le scénario Hestia, transport international de marchandises 181
Tableau 29 : Trafic intérieur de marchandises dans Hestia 183
Tableau 30 : Trafic international de marchandises dans Hestia 184
Tableau 31 : Mesures phares des politiques publiques dans les scénarios Hestia 199
Tableau 32 : Qui perd, qui gagne, dans Hestia 201
Tableau 33 : Quelles évolutions des coûts de transport dans Hestia 204
Tableau 34 : Synthèse des impacts des politiques publiques dans Hestia 205

Avant-propos

La recherche qui a conduit à ce rapport a été commanditée par le Groupe Opérationnel 11 (GO 11) « politiques publiques » du PREDIT 3, en 2004. Elle a été menée conjointement par deux organismes : Enerdata sas, bureau d'études privé, et le Laboratoire d'Economie des Transports, unité mixte de recherche du CNRS de l'Université de Lyon 2 et de l'Ecole nationale des travaux publics de l'Etat (ENTPE). Le comité de pilotage de cette recherche, présidé par Michel Rousselot, président du GO11, était composé des personnes suivantes :

- ADEME : Alain Morcheoine, Nathalie Martinez, Eric Vidalenc
- DRAST : Jacques Theys, Gérard Brun

Cette recherche a été menée en deux phases. Ce rapport traite plus spécifiquement des résultats de la deuxième phase , qui a démarré début 2006 et s'est achevée début 2008. Celle-ci a bénéficié de deux soutiens financiers majeurs : une convention de recherche entre l'ADEME et Enerdata sas et une dotation de la DRAST (aujourd'hui rattachée au MEDAD) au LET. Le solde des coûts a été supporté par les fonds propres d'Enerdata sas et du CNRS. A cela, s'ajoute une bourse de thèse cofinancée par l'Ademe et Enerdata.

La première phase de cette recherche (2004-2005) avait d'abord cherché à répondre à la question : « que faut-il entendre par mobilité durable ? ». Elle avait ensuite permis de clarifier certaines questions relatives à ce que l'on peut attendre de la technologie au regard de la mobilité durable. Certes, l'angle d'attaque de cette question a été essentiellement de nature environnementale, avec une focalisation sur l'effet de serre et le changement climatique. Un travail de requalification des spécifications des technologies au regard des consommations énergétiques et des émissions de CO_2, complété par un travail sur les émissions indirectes dues à ces technologies, a permis d'affiner les résultats de l'étude TEV (PREDIT2), et d'en donner une clé de lecture pour les grands rendez-vous politiques que sont les engagements du Protocole de Kyoto et le « Facteur 4 » à l'horizon 2050. A l'occasion de cette reprise des scénarios TEV et leur extension à 2050, le troisième volet de la première phase a consisté à appliquer, à l'horizon 2050, les apports méthodologiques du programme européen de recherches VLEEM au domaine des transports. La prise en compte explicite de la dimension temporelle et de son corollaire sur les vitesses de déplacement a jeté ainsi une lumière nouvelle et parfois inattendue , tant sur la dynamique de la demande de transport et des trafics, que de leur répartition modale. Il en ressort des enseignements nouveaux, tant sur les conséquences d'un développement tendanciel des transports, que sur les alternatives possibles dans le contexte général du « Facteur 4 ».

Cette recherche s'inscrit dans la lignée de plusieurs travaux majeurs conduits dans les années 90 et au début des années 2000 sur la mobilité et le développement durable à long et très long terme:

- Le volet « arc alpin » de l'étude de l'OCDE sur les transports écologiquement viables (Environmentally Sustainable Transport – EST), qui a jeté les bases de la démarche « backcasting » retenue dans cette recherche ;
- L'extension de l'étude « arc alpin » à l'ensemble de la France dans le cadre du PREDIT 2, laquelle a été l'occasion de formaliser les relations entre l'approche backcasting et l'évaluation des politiques et mesures, également considérées dans cette recherche ;

- La recherche, menée par un consortium européen, qui a conduit au formalisme de la démarche VLEEM (Very Long term Energy Environment Modelling) repris et développé dans cette recherche à travers le modèle TILT (Transport Issues in the Long Term).

Pour des raisons de concision, les développements méthodologiques de ces précédentes recherches sur lesquels nous nous sommes appuyés ne sont que mentionnés et référencés dans ce rapport.

EXECUTIVE SUMMARY

Le Groupe 11 du PREDIT[1] a demandé au Laboratoire d'Economie de Transports (LET) et à Enerdata de produire des scénarios de mobilité durable pour les passagers et les marchandises en France à l'horizon 2050. Le sens donné à la « mobilité durable » était, entre autres, celui d'une mobilité des personnes et des marchandises compatibles avec une réduction par 4 des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports.

Cette recherche s'appuie, pour sa partie quantitative, sur une modélisation des relations systémiques du système de transport formalisée dans le modèle TILT (*Transport Issues in the Long term*)[2]. Ce modèle technico-économique comprend deux modules fondamentaux :

- le premier met en cohérence les trafics par modes avec les vitesses de déplacement et l'usage du temps à partir des déterminants démographiques et macro-économiques de la mobilité.
- le deuxième prend en compte de façon explicite et robuste, l'impact du déploiement des nouvelles technologies sur les émissions directes et indirectes du secteur des transports.

A partir de ces deux modules, TILT est en mesure d'apprécier les différentes combinaisons de niveaux de trafics 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.

Trois familles de scénarios ont été développées.

Une première famille de scénarios, **Pégase,** prolonge, avec deux variantes, AVION et TGV, une vision tendancielle[3] des trafics à l'horizon 2050. Pégase propose une vision de référence qui permet de mesurer les enjeux de la technologie au regard des émissions de CO2 sans remise en cause du modèle de développement de la mobilité tel qu'on le connaît depuis 5 décennies. Dans les deux variantes, les scénarios Pégase aboutissent entre 2000 et 2050 à une hausse de la mobilité de 42% pour les passagers (contre 13% pour la population française sur la même période) et 61% pour les marchandises. Ils montrent que ces hausses de trafics sont incompatibles avec l'objectif facteur 4 si l'on s'en tient aux technologies aujourd'hui maîtrisées ou à celles qui ont une probabilité significative de développement industriel d'ici 2050 : dans le meilleur des cas, la contribution de la technologie ne permettrait pas d'aller au-delà d'un facteur 2. Pour atteindre l'objectif facteur 4 dans un tel contexte de mobilité, il faudrait impérativement pouvoir recourir massivement aux piles à combustible et à l'hydrogène produit sans émissions de CO2 .
Si l'on écarte cette rupture technologique majeure, atteindre l'objectif facteur 4 demande par conséquent une réorganisation d'ensemble du système de transport (répartition modale,

[1] Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres
[2] TILT est dérivé du modèle VLEEM *(Very Long Term Energy Environment Model)* développé dans le cadre d'un projet de recherche européen.
[3] Précisons que les niveaux de trafic obtenus pour les passagers et les marchandises dans Pégase sont calés sur le récent exercice *forecasting* (prospective exploratoire) livré en 2006 par le Conseil Général des Ponts et Chaussée (CGPC), institution de référence en France. La recherche ayant conduit aux projections 2050 du GCPC a été cofinancée par le GO11 via un contrat avec Futurible

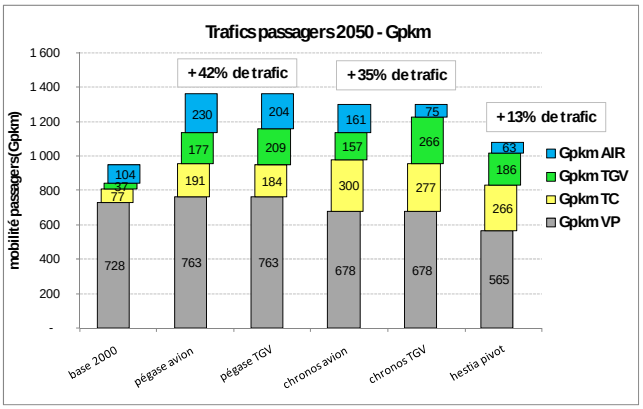
vitesses de déplacement). Les deux autres familles de scénarios, respectivement Chronos et Hestia, visent à explorer les différentes modalités que pourrait prendre cette réorganisation, en supposant l'objectif atteint (démarche de type *backcasting*), selon les facteurs majeurs d'incertitude sur les déterminants de la mobilité et les politiques publiques susceptibles d'être mises en œuvre .

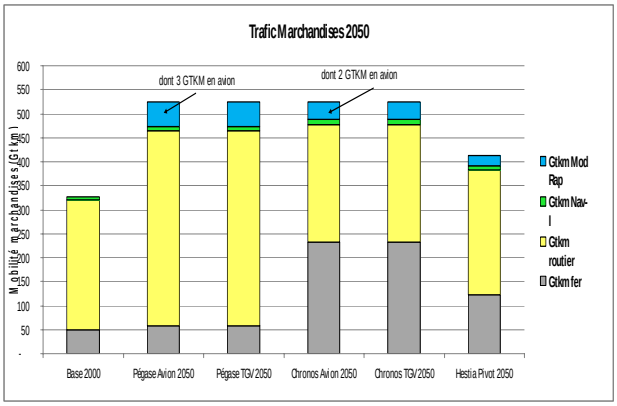
La famille de scénarios **Chronos** explore, dans ses deux variantes, comment franchir la distance au facteur 4 par une action de type réglementaire sur les vitesses routières, conjuguée à un accroissement du coût de la mobilité en fonction de la vitesse et des émissions de CO2, en supposant néanmoins un effet rebond très important sur les budgets-temps de transport. Ils aboutissent à une progression de 35% des trafics passagers par rapport à 2000 et de 61% pour les marchandises. La variante de Chronos dans laquelle le trafic aérien reste en forte progression (+60%) de 2000 à 2050, s'approche de l'objectif sans pour autant l'atteindre. On atteint effectivement l'objectif dans la variante Chronos TGV, mais au prix d'un basculement massif du trafic longue distance de la VP et de l'avion vers le TGV, dont le trafic augmente d'un facteur 7. L'avion se recentre alors exclusivement sur la longue distance, son trafic étant en baisse de 28% par rapport à l'année 2000.

La famille de scénarios **Hestia** est construite sur le constat suivant : même avec des hypothèses technologiques optimistes bien que dans le registre du probable, réorganiser le système des transports pour atteindre le facteur 4 demanderait des investissements considérables dans les transports ferroviaires si les budgets-temps de transport ne sont pas maîtrisés. En conséquence, Hestia explore comment atteindre le facteur 4 par des mécanismes de quotas et permis négociables qui imposent de nouveaux arbitrages sur les localisations des ménages et des activités dans le sens d'une réduction des distances parcourues. La hausse du trafic passagers est ici en phase avec celle de la population soit 13% jusqu'en 2050 alors que la progression du trafic marchandises s'établit à 21%. Les modes les plus émetteurs de C02 voient leur place redéfinie : l'avion se recentre sur la très longue distance alors que la VP se recentre sur le trafic régional.

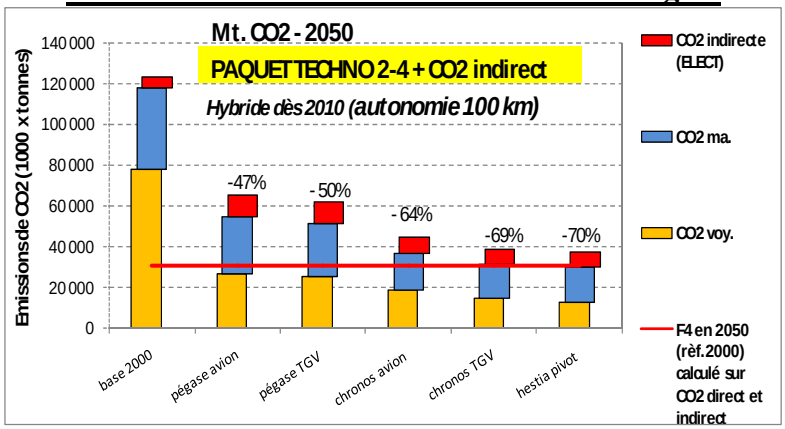
Les graphiques ci-dessous résument les principales projections à 2050 dans le cas d'un sentier technologique optimiste mais « raisonnable » dans lequel les véhicules hybrides bi-énergies (rechargeables) sont commercialisés dés 2010 pour atteindre 100% du parc en 2050, avec, à cette échéance, une autonomie moyenne des voitures et des VUL de 100 km sur la batterie.

Niveaux de trafics selon les scénarios envisagés





Emissions de CO2 selon les scénarios envisagées



1 Introduction générale

1.1 Contexte général de la recherche

1.1.1. L'irruption du « facteur 4 » dans les politiques publiques

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

Afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, les experts du GIEC préconisent de limiter la concentration de dioxyde de carbone à moins de 450 parties par million en volume. Pour atteindre cet objectif, il faut réaliser une division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre à l'horizon 2050.

Cet objectif conduit à une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés sur la même période afin de ne pas compromettre les perspectives de développement des pays en transition et en voie de développement.

Sur la base de ce constat en France, les plus hautes Autorités de l'Etat ont fixé comme objectif à l'horizon 2050, la division par quatre les émissions de gaz à effet de serre en France par rapport au niveau de 1990.

Depuis plusieurs années, de nombreux groupes de travail et plusieurs études se sont penchés sur les conditions de faisabilité de cet objectif « facteur 4 ». Citons entre autres :

- le rapport du Groupe « de Boissieu » « Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 (La Documentation française, Paris, 2006)
- le rapport de mission rendu à la MIES (Mission interministérielle à l'effet de serre) en mars 2004 par Pierre Radanne, alors chargé de mission à la MIES et ancien président de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).
- le scénario « facteur 3 » rédigé par Henri Prévot, Ingénieur général des Mines, dans le deuxième semestre 2003. Il a été élaboré à partir d'un groupe de travail formé de personnes venant des ministères de l'économie, de l'industrie, de l'agriculture, de l'équipement, de l'environnement, du commissariat général du Plan et d'établissements publics d'études ou de recherche.
- le scénario Negawatt a été préparé par l'association Negawatt, rassemblant environ 110 experts et praticiens tous impliqués à titre professionnel dans la maîtrise de la demande d'énergie ou le développement des énergies renouvelables. Il a été présenté en 2003.
- le scénario « facteur 4 » Enerdata - LEPII-EPE, selon une étude commandée par la DGEMP (Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières) en 2005, qui s'appuie sur des méthodes et modèles utilisés dans le passé récent pour différents exercices de prospective énergétique pour la France (MEDEE, POLES).

Plus récemment, deux événements sont venus donner une assise encore plus forte à cet objectif politique que constitue le facteur 4 : le « grenelle de l'Environnement » en France, les objectifs dits « 3 fois 20 » de l'Union Européenne, qui visent entre autres à réduire les émissions de GES de l'UE-27 de 20% en 2020.

1.1.2. Les transports, entre contrainte pétrolière et contrainte climatique

Transport et pétrole sont aujourd'hui intrinsèquement liés dans un paradigme technologique qui domine le monde depuis un siècle. Les transports reposent à plus de 95% sur le pétrole au niveau mondial, et une part majoritaire et croissante du pétrole va aux transports : 37% en 1971, 47% en 1990 et 52% en 2005. En Amérique du Nord, en 2005, les transports absorbent 70% du pétrole consommé. Le pétrole est incontournable pour tous les modes de transports à l'exception possible du transport ferroviaire (électricité). Il n'y a pas d'alternative massive pour les deux prochaines décennies dans le meilleur des cas.

Les études prospectives consacrées à l'énergie et au changement climatique sur un horizon long insistent toutes sur les blocages où nous mènerait un développement général du système de transport selon le paradigme actuel au niveau mondial : blocage au regard des ressources de pétrole conventionnelles et non conventionnelles, blocage au regard de l'impact des émissions de gaz à effet sur le climat.

Malgré les progrès techniques envisagés pour les moteurs actuels, une extrapolation du modèle suivi depuis 30 ans par les pays de l'OCDE aux pays émergents aboutirait en effet à un constat extrêmement préoccupant au regard des disponibilités mondiales prévisibles de pétrole. Une croissance économique du monde relativement modérée tirée par ces pays émergents (autour de 3%/an) sur les prochaines décennies amènerait la demande de pétrole des transports à des niveaux qui, même avec des hypothèses optimistes quant aux ressources récupérables, équivaudraient à la totalité du pétrole conventionnel susceptible d'être produit dans le monde autour de 2035, l'équivalent de l'ensemble du pétrole conventionnel et non conventionnel produit dans le monde autour de 2050.
Une vision moins optimiste des ressources de pétrole mobilisables d'ici 2050[4] situe autour de 2025-2030 le moment où la demande mondiale de pétrole des transports équivaudra à la totalité du pétrole susceptible d'être produit dans le monde.

Par ailleurs, le transport, véhicules et infrastructures, porte une responsabilité croissante dans les émissions de CO2 :

- directement, du fait des véhicules routiers, avions, bateaux qui n'utilisent quasiment que des carburants fossiles,
- indirectement du fait, aujourd'hui, du transport ferroviaire qui utilise de l'électricité, demain de tous les engins de transports qui utiliseront l'hydrogène, lui-même produit à partir de fossiles
- indirectement aussi du fait des matériaux de base –ciment, acier, verre, produits de la chimie organique,… – qui entrent tant dans la production des engins de transport que dans celle des infrastructures.

[4] Voir sur ce point J. Laherrère "Vers un Déclin de la Production Pétrolière" , colloque énergie et développement durable, Institut Supérieur Industriel de Bruxelles, Octobre 2000

Les seules émissions directes de CO2 dues aux transports pèsent aujourd'hui pour près de 22% des émissions totales de CO2 dues à l'énergie, en progression de plus d'un point depuis 1990.

Facteur aggravant, qu'il s'agisse des transports ou des autres usages diffus irremplaçables du pétrole, une part majoritaire et croissante des émissions de CO2 résultant de la combustion du pétrole ne pourront pas faire l'objet d'une capture et d'un stockage, et seront donc en tout état de cause relâchées dans l'atmosphère. Or, à l'horizon 2050, les émissions dues au pétrole pourraient, à elles seules, représenter l'intégralité des émissions maximales acceptables si l'on souhaite maintenir le changement climatique dans des bornes acceptables (accroissement de la température moyenne du globe inférieur à 2°C).

On le voit, le paradigme actuel transport-pétrole devra faire face à des contraintes redoutables – pour ne pas dire insurmontables – dans les prochaines décennies. Un changement de paradigme est à terme inévitable.

Cette recherche s'intéresse aux conditions dans lesquelles le secteur des transports, voyageurs et marchandises, peut faire face à ce défi. Elle vise à construire des scénarios sur les trafics et les émissions de C02 qui, à la fois, respectent l'objectif du facteur 4, et souscrivent à des conditions générales de soutenabilité sous l'angle économique, social et environnemental en précisant de quelle façon on obtient les différents résultats (contexte macroéconomique, organisation de la production et de la distribution, état des technologies, évolution des modes de vie, contenu des politiques publiques). Ces scénarios concernent les transports en France métropolitaine, mais en les inscrivant dans les flux internationaux de voyageurs et de marchandises.

1.2 Fondements et objectifs de la recherche

1.2.1. Une démarche « back-casting, fondées sur les prévisions du CGPC

Le fondement méthodologique de cette recherche est le « backcasting », c'est à dire la compréhension et la quantification des trajectoires susceptibles de nous mener à l'objectif recherché, compte-tenu de la situation où nous sommes et des tendances lourdes à l'œuvre dans le système socio-économique.
Cette démarche exige de bien appréhender les contraintes liées aux différentes temporalités des éléments du système (infrastructures en place, équipements, comportements, organisation,..), mais également les degrés de flexibilité dans l'inflexion des tendances, dans les possibilités d'occurrence de ruptures, notamment dans la sphère technologique, et dans les politiques publiques qui peuvent être mises en œuvre.

Pour autant, cette démarche nécessite de se replacer dans le contexte général dans lequel s'exprime l'objectif : quelle population, quelle croissance économique, quels trafics,…Afin de replacer les enseignements de cette recherche dans une vision aussi consensuelle que possible de ce contexte socio-économique, il a été décidé de prendre appui sur un travail de « forecasting », celui établi par le CGPC en 2006[5]. Ce dernier a le mérite de proposer diverses visions du futur, dont une qui nous intéresse particulièrement dans la mesure où elle constitue

[5] La recherche ayant conduit aux projections 2050 du GCPC a été cofinancée par le GO11 via un contrat avec Futurible

une prolongation des tendances actuelles. Nous sommes donc ainsi en état de préciser les forces motrices à l'œuvre derrière ces tendances. Puis, en nous interrogeant sur les écarts entre les objectifs sous contrainte du facteur 4 et les résultats du scénario tendanciel GCPC, nous pouvons faire émerger d'autres trajectoires possibles ou souhaitables : *i.e.* des scénarios.

Back-casting versus Forecasting

La démarche prévisionnelle classique (**forecasting**) consiste à s'appuyer sur les tendances observées historiquement pour explorer le futur. Dans cette démarche, l'observation des tendances historiques permet en effet d'établir des liens de causalité entre les variables explicatives (les « drivers » : croissance économique, prix ,…) et les variables expliquées (par exemple les trafics) que l'on transpose dans le futur. Cette transposition permet une certaine flexibilité, à la fois dans les hypothèses stipulées sur les « drivers » et sur les liens de causalité avec les variables expliquées, mais reste toutefois très largement déterminée par le « modèle » historique.

La démarche « **back-casting** » (ou téléologique) s'attache à comprendre le jeu des causalités permettant d'atteindre un objectif précis dans le futur et les trajectoires qui en résultent. Partant d'un point d'arrivée stipulé dans le futur (dans cette recherche le « facteur 4 »), elle s'attache à « remonter » les trajectoires jusqu'à aujourd'hui (d'où l'appellation « back-casting ») et à en comprendre les implications sur le plan technique, économique, comportemental, politique. Elle s'articule en deux temps majeurs : a) la description d'une image cohérente du futur, l'objectif étant supposé atteint ; b) la description cohérente de la trajectoire menant à ce futur et de la transition avec les tendances historiques.

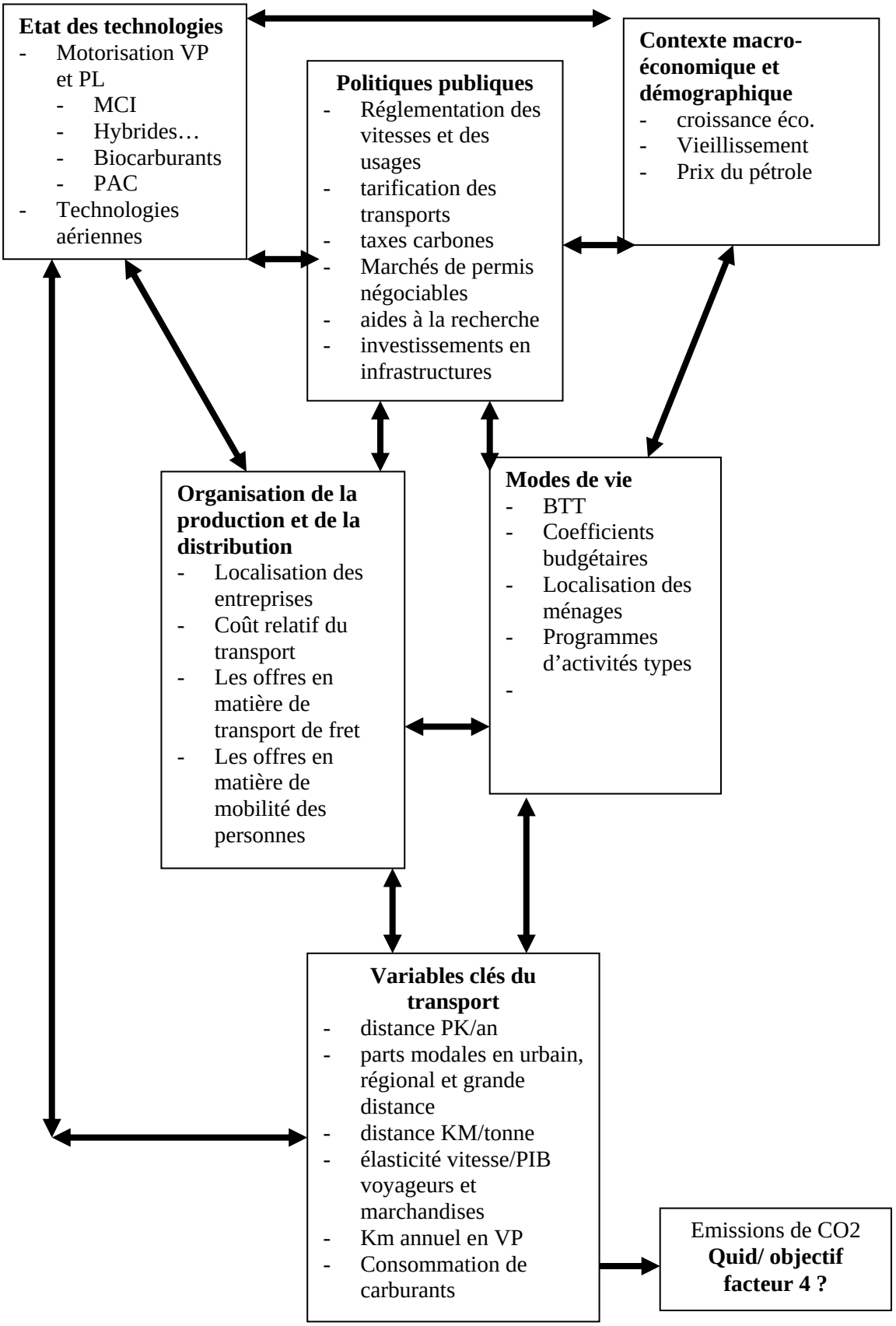
1.2.2. Une représentation systémique pour garantir la cohérence des scénarios.

Les scénarios ne sont pas utopiques, ils correspondent au contraire à des « mondes » très précis, marqués par diverses combinaisons de contraintes et d'opportunités, de leviers et de pratiques

Le contexte macro-économique et démographique joue un rôle important, tout autant bien sûr que le contexte technologique dans ses différentes dimensions et pour les différents modes. Mais pour en déduire les impacts en termes d'indicateurs de mobilité, il est indispensable de préciser ce que sont les modes de vie des ménages et l'organisation de la production et de la distribution des biens et des services. Dans cet ensemble qui fait système, les politiques publiques constituent un élément de régulation qui au final conduit à certains éléments quantitatifs typiques du système de transport (PK, TK…) dont nous déduisons les émissions de CO_2 sous certaines hypothèses technologiques. Cela nous permet donc de dire pourquoi tel scénario permet, ou ne permet pas, d'atteindre le facteur 4, et sous quelle conditions.

Notre représentation de ce système, et la façon dont ses composants interagissent entre eux sont schématisées dans la figure 1 ci-dessous, laquelle constituera notre fil directeur dans la construction des scénarios. Certains de ces composants prendront de fait, selon les scénarios, soit le statut de constantes (en niveau ou en trend) fixant les contraintes d'évolution du système, soit celui de leviers d'action à la disposition des pouvoirs publics pour faire évoluer le système dans la direction et vers le but recherché.

Figure 1 : Les principaux déterminants de la mobilité et de ses impacts environnementaux



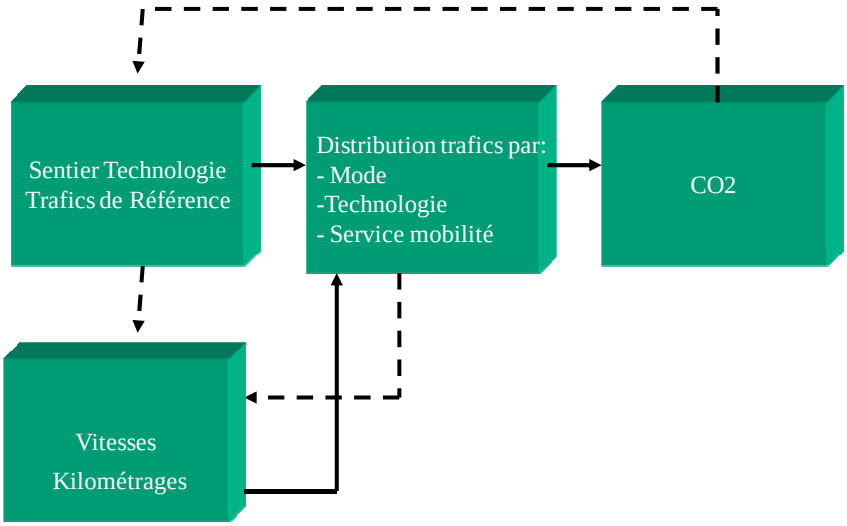
1.2.3. TILT (Transport Issues in the Long Term), un modèle analytique pour quantifier les scénarios

Les relations systémiques et les résultats qui en découlent pour les variables clés du système de transport ont été formalisés dans un modèle analytique démo-économique baptisé TILT (*Transport Issues in the Long Term*)

TILT est dérivé du modèle VLEEM (*Very Long term Energy Environment Model*), développé dans le cadre d'un projet européen, dont il a repris la logique « back-casting » et les représentations fondamentales au regard de la mise en cohérence des trafics par modes, des vitesses et de l'usage du temps.

Pour les besoins de cette recherche, TILT a été développé de façon à pendre en compte de façon explicite et robuste, l'impact du déploiement de nouvelles technologies sur les émissions directes et indirectes du secteur des transports.

La structure générale du modèle TILT développé et utilisé dans cette recherche pour quantifier les scénarios de mobilité durable est schématisée ci-dessous.



1.2.4. Structure de la recherche et du rapport final

Le rapport final se présente en trois grandes parties. La première détaille le contenu de TILT, les questions auxquelles il cherche à répondre et les choix méthodologiques. La seconde s'intéresse aux principes de construction des scénarios de mobilité durable, et leur articulation avec le scénario tendanciel du CGPC qui nous sert de référence. La troisième partie présente le détail des scénarios, leur contenu, notamment en termes de politiques publiques, et leurs implications par rapport à l'objectif du facteur 4.

Des trois familles de scénarios présentées, se dégagent quelques idées importantes pour comprendre les enjeux des politiques de mobilité durable.

- Le défi technologique pour arriver au facteur 4 est considérable, quelle que soit la configuration du scénario. Rien ne permet d'affirmer aujourd'hui qu'il pourra être relevé en temps et en heure. Cela est évident pour la première famille de scénarios Pégase, qui se rapproche le plus des grandes tendances passées.

- C'est pourquoi, dans les deux autres familles de scénarios, la question de la maîtrise des vitesses, vitesse globale de déplacement des personnes et des marchandises et vitesses par modes, devient centrale. Elle a des effets directs sur les consommations d'énergie et les émissions spécifiques de CO_2 des modes, et des effets indirects sur les répartitions modales.
- Ainsi, le message principal de la seconde famille de scénarios Chronos est de montrer comment la maîtrise des vitesses peut permettre de relâcher la contrainte technologique pour atteindre le facteur 4 et de contribuer aux autres dimensions de la mobilité durable, mais également d'en montrer les limites, notamment au regard de la dynamique des trafics.
- Si maîtriser les vitesses ne suffit pas, en particulier du fait des effets rebond susceptibles de se produire, et s'il faut alors durcir les conditions réglementaires et/ou économiques, la maîtrise de l'espace devient alors l'enjeu majeur de la nécessaire inflexion des kilomètres parcourus. Le message principal de la troisième famille de scénarios « Hestia » est de montrer qu'il existe des espaces de liberté pour atteindre le facteur 4 et la mobilité durable, même dans une vision plutôt pessimiste de ce que l'on peut attendre de la technologie, mais au prix d'inflexions majeures dans certaines tendances considérées aujourd'hui comme « très lourdes ».

2 Partie 1 : TILT, un modèle pour quantifier les scénarios de mobilité durable

2.1 Introduction

Les modèles transport-énergie-environnement utilisés habituellement, permettent d'établir des projections de trafics par modes, de consommations énergétiques et d'émissions, suffisamment robustes, mais à trois conditions :

- aucune technologie, aujourd'hui inconnue, n'est à même de jouer un rôle significatif sur le système de transport, à l'horizon retenu
- l'émergence éventuelle de nouveaux (et inconnus) systèmes de valeurs et de préférence ne peut en aucune façon jouer de rôle significatif sur la demande de transport et les conditions de sa satisfaction, à l'horizon retenu
- il n'y a pas de rupture majeure du système socio-économique dans l'horizon de temps considéré, telles que guerre, rupture physique majeure d'approvisionnement énergétique, désastre climatique,…

Ces conditions limitent généralement l'horizon de fiabilité des projections à 25-30 ans : c'est le temps nécessaire pour qu'une découverte scientifique commence à se traduire en technologie diffusée de façon significative, ou encore le temps séparant deux générations ayant de fortes différences en matière de comportement et de préférences, ou encore le temps nécessaire pour développer des infrastructures pour des modes nouveaux.

Au-delà de 30 ans commence le « très long terme », pour lequel les modèles ci-dessus deviennent de moins en moins fiables à mesure que l'horizon prospectif s'éloigne. Et pourtant, les nouveaux défis liés au changement climatique, à l'épuisement des ressources fossiles conventionnelles, de même que le calendrier exigé par le développement des technologies permettant d'y faire face, exigent de prospecter l'avenir sur des durées très longues, 50 ans et plus.

La philosophie habituelle des modèles de long terme repose sur deux idées maîtresses :

- décrire et formaliser la réalité des processus sous-jacents à la demande de transport et sa traduction énergétique et environnementale, d'un point de vue économique **et** technique (ingénieur),
- recourir aux scénarios pour analyser et quantifier les conséquences des incertitudes événementielles, des incertitudes sur les atermoiements des politiques, et des incertitudes liées à notre mauvaise connaissance des processus ou résultant de l'impossibilité de les formaliser

Cette philosophie a montré sa pertinence sur les horizons de temps sur lesquels ces modèles ont été utilisés de façon fiable, soit une trentaine d'années. Au-delà, elle soulève des problèmes quant à la pertinence de la description même des besoins de mobilité et du système de transport, et du fait que les incertitudes de toutes natures augmentent vertigineusement. Même avec des situations de départ identiques, les trajectoires du système global peuvent être vues sur le très long terme comme un gigantesque écheveau d'enchaînements chaotiques de causalités, pour lesquels aucune analyse de cohérence socio-économique –et a fortiori de probabilité – ne peut être entreprise raisonnablement.

Pour dépasser ces limites, et profiter en même temps de l'accumulation d'expérience avec les modèles de long terme éprouvés, il est nécessaire de développer une nouvelle génération de « modèles transport-énergie-environnement de très long terme » basés sur le même mode de description de la réalité que les précédents, mais enrichis avec deux nouvelles « idées » :

- puisque le champs des possibles est complètement ouvert sur le très long terme, ce qui importe n'est pas tant de décrire ce champs que de décrire des futurs compatibles avec le respect d'un jeu de contraintes globales imposées au système, qu'il s'agisse d'invariants de nature comportementale ou organisationnel, ou de contraintes imposées au système de transport comme la stabilisation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ou le non recours aux hydrocarbures comme produits énergétiques, etc.…
- plutôt que se limiter à n'explorer et formaliser que des enchaînements de causalité basés sur notre connaissance du passé, il faut s'attacher à décrire et formaliser les enchaînements de causalités nécessaires pour conduire le système économique de la situation présente à l'état futur requis, selon une démarche téléologique (back-casting), dans laquelle les concepts pertinents pour décrire les besoins de mobilité et l'organisation du système de transport sont redéfinis.

Cette problématique de modélisation à très long terme dans un contexte de soutenabilité est la même que celle qui a présidé à la conceptualisation de l'approche « VLEEM[6] » et au développement du modèle de même nom, lequel a servi de point d'appui au développement de la modélisation quantitative dans cette recherche.

[6] VLEEM (Very Long Term Energy Environment Modelling) a été conçu et mis au point dans le cadre d'une recherche européenne entre 2002 et 2004. La composante de VLEEM qui a servi de point d'appui à cette recherche est celle relative à la prospective des besoins de services énergétiques. Pour plus de détail sur VLEEM, on renvoie le lecteur au site www.VLEEM.org.

2.2 Du modèle VLEEM au modèle TILT

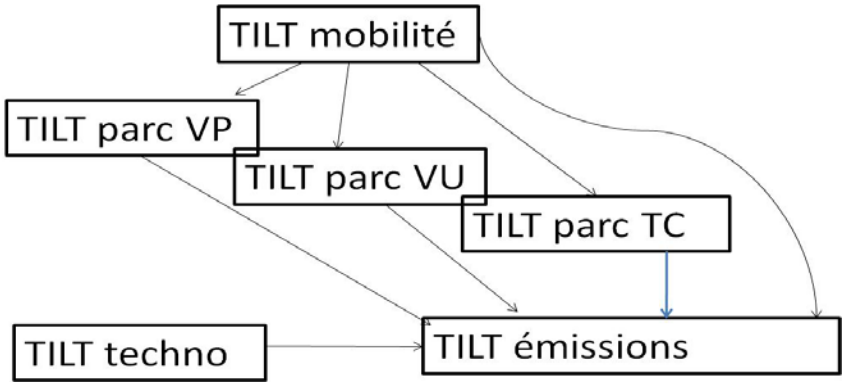
Le modèle VLEEM s'attache à décrire de façon quantitative la dynamique des besoins de services énergétiques en relation avec la démographie et l'éducation sur des périodes très longues (de l'ordre du siècle), dans une approche de type back-casting. Sans être spécialement centré sur la problématique des transports, ce modèle l'intègre en tant qu'une des composantes des besoins de services énergétiques.

Toutefois, VLEEM, tout en constituant une excellente base de travail, ne pouvait répondre en l'état aux exigences de la recherche sur la mobilité durable pour deux raisons : l'insuffisante description des services de mobilité, l'absence d'une modélisation permettant de lier les besoins de mobilité aux consommations d'énergie et aux émissions de GES.

L'essentiel du travail de modélisation conduit dans cette recherche a visé à développer les fonctionnalités permettant de répondre à ces limites et permettant de quantifier en détail les scénarios de mobilité durable que l'on serait amené à construire.

Le nouveau modèle auquel a conduit ce travail a été baptisé TILT : « Transport Issues on Long Term ». La structure générale de TILT est schématisée ci-dessous.

Figure 2 : Structure générale du modèle TILT



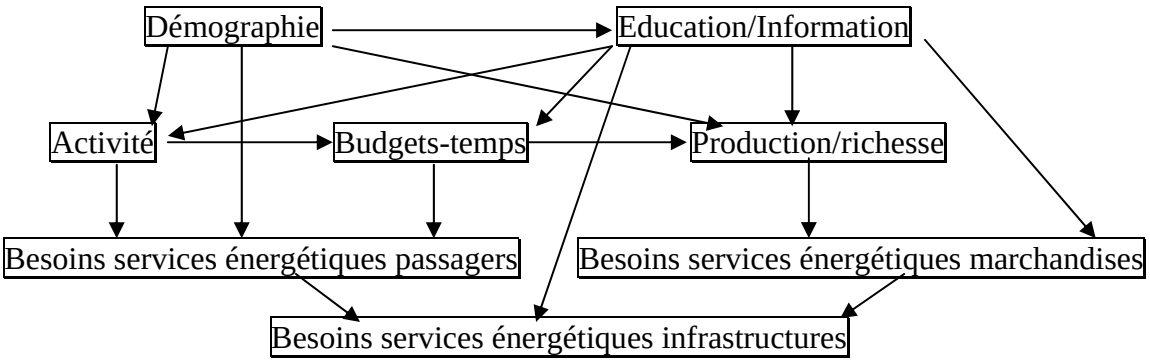
2.2.1. Mise en cohérence des éléments de contexte : l'héritage de VLEEM

Les éléments de contexte que l'on cherche à mettre en cohérence sont ceux qui déterminent fondamentalement les besoins de mobilité et les besoins de services énergétiques associés à cette mobilité : population, croissance économique, prix, etc.…
Dans les travaux prévisionnels et les travaux prospectifs sur deux ou trois décennies, ces éléments de contexte sont généralement pris comme input dans les modèles via des hypothèses largement indépendantes les unes des autres. A mesure que l'on s'éloigne dans le temps, cette façon de procéder devient de moins en moins pertinente, et perd une grande partie de sa crédibilité dès que l'on s'approche ou l'on dépasse 50 ans : la croissance économique dépend de la population active et de sa productivité, qui elles-mêmes dépendent de la dynamique démographique et de la formation, qui influence le temps disponible pour le travail, etc.

Pour construire des scénarios de mobilité à l'horizon 2050, il importe donc de s'assurer de la mise en cohérence de tous ces déterminants fondamentaux de la mobilité et des besoins de services énergétiques induits. Pour cela, on s'appuie sur la structure initiale du modèle VLEEM, dont une partie sera structurellement incorporée au modèle TILT développé dans le cadre de ce projet.

La structure générale du modèle VLEEM sur laquelle on s'appuie est résumée dans le schéma fonctionnel simplifié ci-dessous qui indique l'articulation entre les différents modules de simulation, que l'on passera ensuite brièvement en revue

Figure 3 : Schéma fonctionnel simplifié de VLEEM



2.2.1.1 Module "Démographie"

Le module "Démographie" est structuré de la façon suivante:

- 4 classes d'âge pour la population: <25 ans; 25-49; 50-74; >74
- 3 zones d'habitation/ensembles sociaux: rural, urbain, sub-urbain/migrants
- 4 ensembles de ménages: ménages d'une personne, ménage monoparental avec un enfant, autres ménages de deux personnes, ménages de plus de deux personnes

Ses inputs sont:

- les taux de fertilité par classe d'âge, avec et sans nuptialité
- la mortalité infantile et les probabilités de survie en fonction de l'âge
- la population rurale maximale et les flux migratoires externes.

Ses outputs sont:

- les populations par classes d'âge et zones d'habitation
- les ménages par classe d'âge du chef de famille, par zone d'habitation et par type de ménage
- le nombre moyen de personnes par ménage et le nombre moyen d'enfants par ménage de plus de deux personnes;

Pour plus de détail sur le principe de fonctionnement du module "Démographie», on renvoie au site www.VLEEM.org.

2.2.1.2 Module "information/éducation"

Le module information/éducation est structuré de la façon suivante:

- trois cycles de formation: primaire, secondaire, tertiaire-supérieur
- 4 classes d'âge (cf. ci-dessus)
- 3 ensembles sociaux: urbain, rural, migrants.

Ses inputs sont:

- les taux de scolarisation effective par cycle
- les contenus relatifs en "information" des cycles
- la population par tranche d'âge

Son output unique est le niveau d'information du système socio-économique. Celui-ci joue 3 rôles fondamentaux dans la modélisation : il détermine la productivité horaire du travail, il conditionne le niveau d'efficience technologique général du système économique, il détermine la structure des budgets-temps.

Hypothèse fondamentale: le niveau d'information d'une personne au cours de sa vie est déterminé par le plus haut cycle de formation initiale atteint.

Pour plus de détail sur le principe de fonctionnement du module "information/éducation», on renvoie au site www.VLEEM.org.

2.2.1.3 Module "activité"

Le module activité est structuré de la façon suivante:

- 3 classes d'âge pour le chef de famille (toutes sauf 0-24 ans)
- 4 classes de ménages (toutes classes, cf. ci-dessus)
- 2 zones de résidence/ensembles sociaux: rural, urbain
- 3 statuts pour les actifs: chef de famille, conjoint, enfant

Ses inputs sont:

- l'âge de la retraite
- les taux maxima d'activité selon le statut des actifs
- le nombre d'enfants pour les ménages de plus de deux personnes

Ses outputs sont les taux moyens maxima d'activité par personne moyenne par tranche d'âge et lieu de résidence. Ce taux moyen d'activité détermine fondamentalement le niveau potentiel d'activité économique, de production et de richesse, en combinaison avec la productivité horaire et les budgets-temps.

Pour plus de détail sur le principe de fonctionnement du module " activité», on renvoie au site www.VLEEM.org.

2.2.1.4 Module "budget temps"

Le module budget temps est structuré de la façon suivante:

- 4 fonctions socio-culturelles explicites: alimentation, tanière, accomplissement de soi, travail rémunéré pour autrui; une fonction implicite: le déplacement
- 3 classes d'âge pour le chef de famille
- 2 zones de résidence/ensembles sociaux: rural, urbain

Ses inputs sont:

- la part du budget temps du ménage consacré à la fonction alimentation
- les rythmes observés/légaux du travail salarié
- les taux moyens d'activité par personne moyenne d'un ménage
- le nombre d'enfants pour les ménages de plus de deux personnes

Ses outputs sont:

- le nombre d'heures moyen consacré à la fonction "alimentation"

- le nombre d'heures moyen consacré à la fonction "travail rémunéré pour autrui"
- le nombre d'heures moyen consacré à la fonction "accomplissement de soi".

Hypothèses fondamentales:

- la part du budget-temps consacré à la fonction "tanière" est la même pour tous, égal à 35%
- la part du budget temps d'un ménage consacré à la fonction "alimentation" est stable tout au long de la vie du chef de famille.
- la part du budget-temps consacré au déplacement, stable historiquement, devient une variable

Pour plus de détail sur le principe de fonctionnement du module " budget temps», on renvoie au site www.VLEEM.org.

2.2.1.5 Module "production de richesses"

Le module production de richesses est structuré de la façon suivante:

- 3 ensembles sociaux: urbain, rural, migrants.

Ses inputs sont:

- le niveau d'information du système socio-économique
- le volume d'heures rémunérées travaillées pour autrui
- le taux d'utilisation effectif du potentiel de production

Ses outputs sont:

- les volumes potentiel et effectif de production (en indice)
- la parité de pouvoir d'achat sur le marché international (en indice)
- la richesse crée (en indice)
- l'indicateur d'aisance économique et financière de la population (en indice)

Pour plus de détail sur le principe de fonctionnement du module " production de richesses», on renvoie au site www.VLEEM.org.

2.2.2. Transports de passagers : mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de mobilité

Le modèle VLEEM incorpore un sous-modèle visant à projeter les besoins de services énergétiques induits par la mobilité des personnes. Le formalisme de ce sous-modèle a servi de base au développement du modèle TILT.

Il n'y a pas à proprement parler dans VLEEM de modélisation de la dynamique des transports de personnes comme on la trouve dans un modèle de transport habituel. L'objectif visé avec VLEEM est de produire une vision prospective de la mobilité globale des personnes et des besoins de services énergétiques induits qui soit cohérente

- d'une part avec l'évolution inter-reliée des déterminants fondamentaux (cf. ci-dessus)
- d'autre part avec des invariants (ou pseudo-invariants) relatifs aux comportements moyens individuels caractéristiques d'un paradigme donné : structure des budgets-temps, système de préférences, liaison entre valeur du temps et taux de rémunération de l'heure travaillée.

En ce sens, VLEEM s'attache plus à la dynamique de la segmentation de la mobilité en fonction des besoins de services énergétiques induits (très dépendants du mode et de la vitesse) qu'au volume de la mobilité lui-même.

Dans le cadre de cette recherche sur la mobilité durable, il est apparu nécessaire de prolonger ce cadre de modélisation pour prendre en compte deux dimensions additionnelles :

- la segmentation des besoins de mobilité selon les différents services de mobilité, pour lesquels les substitutions modales se posent en termes spécifiques : urbain, régional, longue distance, très longue distance ;
- la différenciation et le plafonnement des vitesses par mode selon les services de mobilité.

Le développement du modèle TILT au regard de la mobilité des personnes répond à ce prolongement de la modélisation. Il n'apporte rien de plus sur la génération de la mobilité, mais procure en revanche un cadre de mise en cohérence beaucoup plus strict pour les projections de mobilité par modes sur le très long terme.

2.2.2.1 *Besoins de services énergétiques pour les passagers dans le modèle VLEEM*

Le module " Besoins de services énergétiques pour les passagers " de VLEEM est structuré de la façon suivante:

- 3 services énergétiques: modes "doux", véhicules individuels, transport collectif
- 3 infrastructures
  - route
  - fer
  - air
- 4 types de ménages (cf. "module démographique")

Ses inputs sont:

- les trafics et les vitesses moyennes par mode à l'année de base
- la population et le nombre de ménages par type
- l'aisance économique et financière
- le niveau d'information

Ses outputs sont:

- le taux d'équipement des ménages en mode individuel motorisé de transport
- les heures passées en déplacement
- les vitesses moyennes, globalement et par mode
- les km parcourus en moyenne par heure selon les différents modes (et donc in-fine les trafics par mode).

Le **principe de fonctionnement** de ce module " Besoins de services énergétiques pour les passagers " est le suivant:

- on calcule le taux d'équipement moyen des ménages en modes individuels motorisés de transport à la fin de chaque période, sur la base d'hypothèses sur le niveau de saturation de l'équipement par catégorie de ménages (fonction du nombre de personnes en âge de conduire, du mode d'urbanisation et d'un malthusianisme plus ou moins prononcé) et d'une corrélation à l'indice d'aisance économique et financière (fonction logistique);
- on calcule le volume global d'heures consacrées aux déplacements de personnes à partir des budgets-temps (1 heure/jour/personne dans le paradigme actuel) et de la population, ainsi que la vitesse moyenne de déplacement, en corrélant cette dernière à l'indice d'aisance économique et financière selon une élasticité fixe estimée statistiquement;

- on calcule les vitesses moyennes par mode de la façon suivante: hypothèse sur la vitesse moyenne des déplacements "doux"; corrélation de la vitesse moyenne des modes individuels avec le niveau d'information du système socio-économique (élasticité fixe) ou hypothèse structurante fonction du scénario; déduction de la vitesse moyenne des modes collectifs à partir de la vitesse globale moyenne et des mobilités assurées par les modes doux et individuels motorisés (hypothèses complémentaires sur l'utilisation annuelle du mode individuel en km/an et taux de remplissage moyen selon les catégories de ménages);

Figure 4 : Exemple de calcul des vitesses et mobilité par mode dans VLEEM

	BTT	Elas vit / PIB	km/ an/ VP sat	
Variables clés	1,2	0,33	13500	
	Services énergétiques, mobilité des personnes, 2050			
	Modes doux	Individuel	Public	Total
Unités de services énergétiques	pkm	pkm	pkm	
Million heures	29294	29294	29294	29294
Services énergétiques (ES) /h	0,60	23,2	20,5	44,3
Vitesse moyenne par mode	5,00	37	81	44,3
Hypothèses structurantes				
Résultats de calcul				

2.2.2.2 Mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de transport dans TILT

On distingue dans TILT quatre grands services de mobilité des personnes :

- services de mobilité urbaine : déplacements de la vie courante, correspondant à l'espace des ZPIU
- services de mobilité régionale : déplacements de la vie courante et déplacements occasionnels à moins de 150 km
- services de mobilité de longue distance : déplacements occasionnels privés et professionnels à moins de 2000 km
- services de mobilité de très longue distance : voyages privés et professionnels à plus de 2000 km.

Les besoins de services de mobilité urbaine et régionale, très liés à l'urbanisation et aux infrastructures, font l'objet d'hypothèses exogènes, exprimées en km/an/cap.
La vitesse des modes sur ces espaces est fortement déterminée par la nature des infrastructures ; elle varie assez peu en valeur absolue et reste globalement plafonnée par les possibilités d'extension des infrastructures les plus rapides.

Les besoins de mobilité de longue et très longue distance se déduisent des besoins globaux de mobilité et des besoins de mobilité urbaine et régionale. Globalement, la vitesse moyenne de ces déplacements sur longue et très longue distance doit restée cohérente avec :

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

Une part de ces services de mobilité est assurée par la voiture individuelle[7]. Le recours à la voiture dans la mobilité urbaine et régionale dépend étroitement des infrastructures alternatives qui sont en place et des vitesses de déplacement sur ces infrastructures. Ces éléments, très liés aux politiques de développement des infrastructures, sont considérés de façon exogène, comme indicateurs des politiques menées.
Le recours à la voiture pour la mobilité de longue distance doit donc être mis en cohérence avec d'une part l'équipement et l'usage moyen global de la voiture (km/an/voiture), d'autre part son usage urbain et régional. Dans le paradigme actuel, on considère que :

- l'équipement automobile se poursuivra jusqu'à atteindre un niveau de saturation lié à la population en âge et état de conduire.
- L'usage annuel moyen de la voiture est borné en tout état de cause en-deçà d'une limite (en km par an par voiture) caractéristique du paradigme.

Le processus de mise en cohérence consiste :

a) à déduire, du nombre total d'heures passées dans les VP (parc x km/an/VP / vitesse moyenne) celles passées en urbain et en déplacement régionaux (km parcourus par service x % VP dans services / vitesse VP par service)
b) à calculer le nombre global d'heures passées en VP dans les services de déplacement de longue distance (solde des km VP / vitesse VP service longue distance)
c) à rechercher l'identité des deux nombres en « jouant » d'une part sur le poids de la VP dans les services de mobilité urbain et régional, d'autre part sur les vitesses de la VP selon les différents services de mobilité.

Figure 5 : Exemple de mise en cohérence des vitesses et usages VP dans TILT

Mise en cohérence vitesses/usages VP				
	2050	**VP, %**	**Gpkm VP**	**Heures VP**
Total Gpkm	1325			15,26
Urbain	388	72%	279	9,31
Régional	334	85%	284	4,18
Longue distance	603	33,1%	200	**1,77**
			763,11	**1,74**
			Test de contôle	**-0,04**
Mobilité individuelle	**2000**	**2050**		
kpkm/hab	16,2	19,8		
Urbain	4,8	5,8		
Régional	3,5	5,0		
Longue distance	7,8	9,0		
Vitesses	**km/h tous modes**	**km/h VP**		
Urbain	24,0	30		
Regional	67	68		
Inter-regional	185	90		
Hypothèses structurantes				
Résultats de calcul				
Test de mise en cohérence				
Reprise module précédent				

[7] La voiture individuelle renvoie à la notion de mode individuel motorisé de transport, l'objet lui-même pouvant être assez radicalement différent de l'objet « voiture » tel qu'on le connaît aujourd'hui.

Une fois les vitesses et les usages de la voiture mis en cohérence, il reste ensuite à mettre en cohérence trois évolutions relatives aux services de mobilité de longue et très longue distance :

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

Cette mise en cohérence résulte in-fine sur une structure possible de la mobilité de longue et très longue distance par modes.

Le processus de mise en cohérence consiste :

a) à agréger les heures passées dans les différents modes pour les services de mobilité de longue distance (km parcourus en longue distance x % modes dans ces km / vitesse nominale des modes sur longue distance)
b) à calculer le nombre d'heures passées dans les services de déplacement de longue distance (km longue distance / vitesse moyenne longue distance)
c) à rechercher l'identité des deux nombres en « jouant » d'une part sur le poids de l'avion et des transports publics terrestres lents, d'autre part sur les vitesses de la VP et des modes terrestres lents sur la longue distance.

Figure 6 : Exemple de mise en cohérence des vitesses et parts modales pour la longue distance dans TILT

Mise en cohérence des vitesses et de la distribution modale pour la longue distance

	Vitesses km/h tous modes	km/h VP	%	kpkm/hab	heures
Ensemble	54				
Urbain	24,0	30			
Regional	67	68			
Inter-regional	185	90			
VP	115	115	33,1%	2,98	25,9
Bus, trains classiques	90		4%	0,36	4,0
TGV	250		39,9%	3,60	14,4
Avion	500		23,0%	2,07	4,1
Tous modes			100,0%	9,02	**48,49**
					48,71
			60,1%		
				Test de contôle	**-0,21**

Parts de marché du rail dans le transport public terrestre (hors TGV)

	%fer 2000	%fer 2050
Urban	52%	**80%**
Regional	51%	**70%**
Inter-regional	0%	
normal trains	49%	**80%**

Hypothèses structurantes	
Résultats de calcul	
Test de mise en cohérence	

2.2.3. Transports de marchandises : mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de transport

Le modèle VLEEM incorpore également un sous-modèle visant à projeter les besoins de services énergétiques induits par le transport des marchandises. Le formalisme de ce sous-modèle a servi de base au développement du modèle TILT.

Il n'y a pas non plus à proprement parler dans VLEEM de modélisation de la dynamique des transports de marchandises comme on la trouve dans un modèle de transport habituel. L'objectif visé avec VLEEM est de produire une vision prospective du trafic global des marchandises et des besoins de services énergétiques induits qui soit cohérente

- d'une part avec l'évolution inter-reliée des déterminants fondamentaux (cf. ci-dessus)
- d'autre part avec des invariants (ou pseudo-invariants) relatifs à l'organisation du système de transport de marchandises caractéristiques d'un paradigme donné : liaison entre valeur à la tonne transportée et vitesse moyenne de déplacement des marchandises, « juste-à-temps ».

En ce sens, VLEEM s'attache plus à la dynamique de la segmentation du transport de marchandises en fonction des besoins de services énergétiques induits (très dépendants du mode et de la vitesse) qu'au volume du trafic de marchandises lui-même.

Dans le cadre de cette recherche sur la mobilité durable, il est apparu également nécessaire de prolonger ce cadre de modélisation pour prendre en compte deux dimensions additionnelles :

- la segmentation des besoins de transport de marchandises selon les différents services de transport, pour lesquels les substitutions modales se posent en termes spécifiques : urbain, régional, longue distance, très longue distance ;
- la différenciation et le plafonnement des vitesses par mode selon les services de transport.

Le développement du modèle TILT répond à ce prolongement de la modélisation. Il n'apporte rien de plus sur la génération du trafic de marchandises, mais procure en revanche un cadre de mise en cohérence beaucoup plus strict pour les projections de trafic sur le très long terme.

2.2.3.1 Besoins de services énergétiques pour les marchandises dans le modèle VLEEM

Le module " Besoins de services énergétiques pour les marchandises " est structuré de la façon suivante:

- 5 modes
  - route
  - fer
  - transport rapide
  - voie d'eau
  - mer

Ses inputs sont:

- les trafics et les vitesses moyennes par mode à l'année de base
- le volume de production
- le niveau d'information

Ses outputs sont:

- le trafic total de marchandises (Tkm)
- la vitesse moyenne globale.

Le principe de fonctionnement du module " Besoins de services énergétiques pour les marchandises " dans VLEEM est le suivant:

- on calcule le trafic global de marchandises en corrélant les tonnes-km (service énergétique) par habitant au volume de production, selon une élasticité fixe (estimée statistiquement ou stipulée de façon exogène), et en multipliant par la population;
- on calcule la vitesse moyenne de déplacement des marchandises en la corrélant à l'indice de production, selon une élasticité fixe estimée statistiquement

Figure 7 : Exemple de calcul des vitesses et trafics par mode dans VLEEM

	Elas tkm / PIB	Elas vitesse / PIB, France	Elas vitesse / PIB, Europe	
Variables clés	0,69	0,3	0,3	
	Services énergétiques 2050			
	route	**rail, air**	**Voies d'eau**	**Total**
Unités de services énergétiques	tkm	tkm	tkm	tkm
Gton-km	344	71	10	425
Services énergétiques (ES) /tkm				1,0
Vitesse moyenne par mode	60,0	63,0	10,0	54
Hypothèses structurantes				
Résultats de calcul				

2.2.3.2 Retour sur la dynamique des transports de marchandises

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

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

D'autre part nous observons que les ratios Tkm national/T national et Tkm international/T international pour la France sont en hausse depuis 20 ans mais que le ratio Tkm intérieur/T intérieur est stable au long de la même période.

Enfin nous observons qu'historiquement, le temps moyen passé par les marchandises dans un moyen de transport en France est relativement stable (+2% sur 15 ans) et que les vitesses des moyens de transport terrestres en France ne cessent d'augmenter (+15% sur 15 ans).

Ces constats nous laissent supposer que :

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

De par la situation géographique de la France, ces deux premières suppositions ne sont pas sans conséquence sur la situation française. Ces suppositions amènent à dire que le besoin croissant de la France en matière de vitesse est lié au fait suivant :

- plus le PIB de l'Europe et de la France augmentent et ses économies se spécialisent sur la production des marchandises à haute valeur ajoutée, plus les inputs nécessaires à la production ainsi que les produits finis auront de la valeur. De ce fait, les marchandises devront être transportées de plus en plus rapidement à leur destination finale (en France ou en Europe).

Ce qui amène à croire que plus rapidement on peut transporter une tonne de marchandise finie à haute valeur ajoutée, destinée à la consommation, plus on peut étendre la zone de marché en augmentant les distances parcourues (ceci sans prendre en compte les dérives logistiques éventuelles liées à la faible part du coût du transport dans le prix de la marchandise).

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

Dans un contexte d'augmentation du coût du transport (un enchérissement d'autant plus renforcé du fait des politiques visant une réduction de consommation de carburant), la logique de réduction des coûts inhérents au transport des marchandises, passera par la réduction des temps de transport et/ou la réduction des distances et/ou une optimisation logistique.

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

Ainsi, si nous supposons, que :

Le coût logistique d'une économie est la somme des coûts de toutes les firmes et que le changement proportionnel dans le coût moyen par Vkm est une combinaison de changements proportionnels dans le transport et un changement graduel dans les autres coûts.

Et

Que nous sommes dans un système où les coûts changent en rapport au coût de transport (proportionnel à la vitesse, à la valeur de la marchandise, au niveau du salaire et autres coûts propres du transport) le coût d'inventaire (soit le coût d'immobilisation) et les coûts de procuration.

Nous pouvons alors dire que le coût logistique pour une firme est égal à[8] :

$$C = a - b * VKM_0$$

Où

$$a = \left[C_0^T + \left(C_0^T / N\right)\right]$$
$$b = \left[C_0^T + \left(N * VKM_0\right)\right]$$

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 de procuration

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

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

Au moment d'introduire une amélioration ou détérioration dans le système de transport, nous pouvons alors calculer le coût et la demande de transport à la période suivante avec les mêmes équations en rajoutant les effets de cette amélioration ou détérioration sur les kilomètres parcourus.

Nous avons donc la nouvelle fonction de coût

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

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

Où

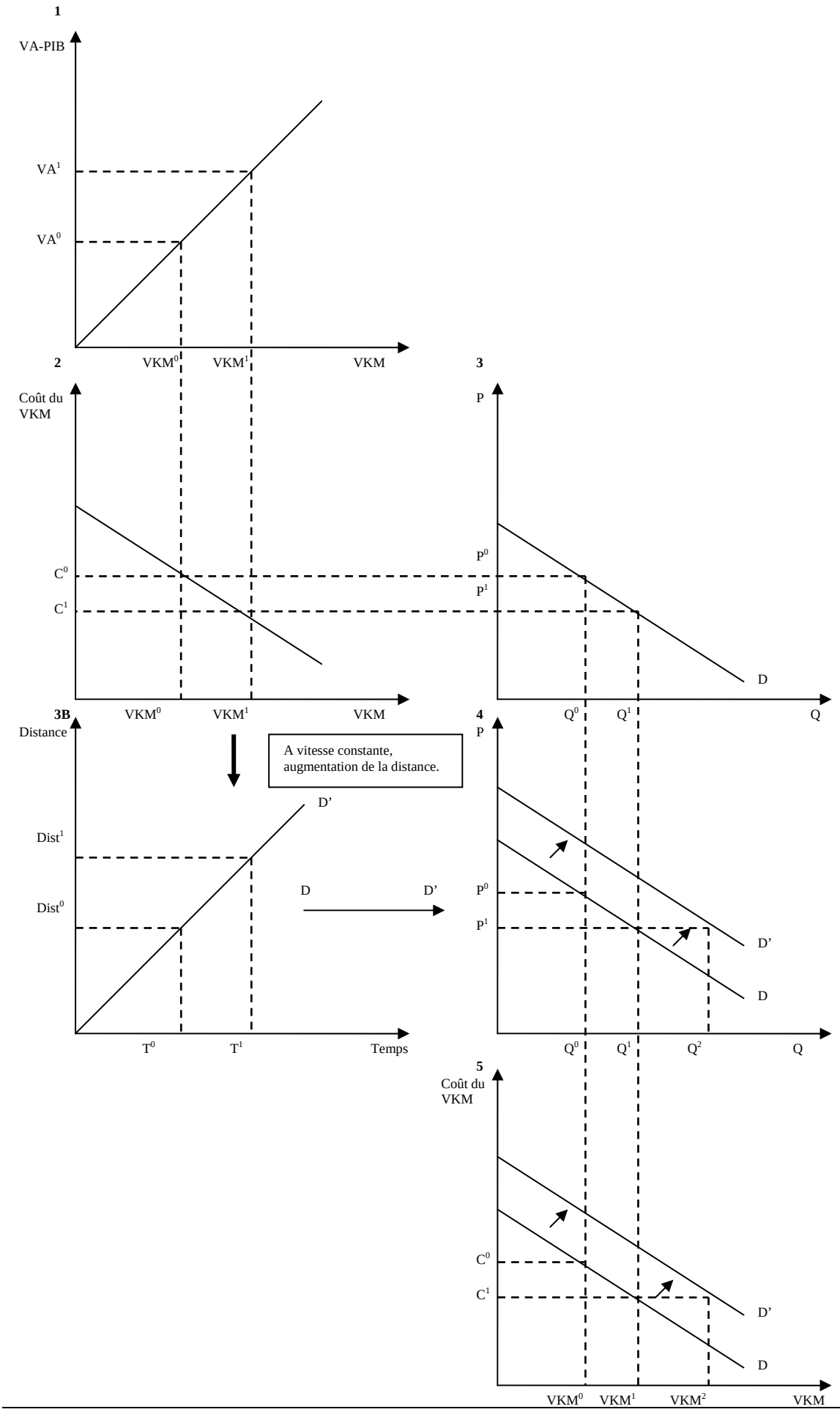
$$a' = \left[C_0^T + \left(C_0^T / N\right)\right] / \left(1 + DVKM\right)$$
$$b' = \left[C_0^T + \left(N * VM_0\right)\right] / \left(1 + DVKM\right)^2$$

$DVKM$ est le pourcentage de changement d'utilisation de la route utilisé par les firmes pour saturer leurs besoins en transport

Nous avons donc la nouvelle fonction de demande qui est égale à :

$$VKM' = \left(a'/b'\right) - \left(b'/C'\right)$$

A partir de ces spécifications, nous pouvons donc décrire, sur la base des graphs suivants, le fonctionnement du système de transport de fret.


1
VA-PIB
VA1
VA0
VKM0
VKM1
VKM
2
Coût du VKM
C0
C1
VKM0
VKM1
VKM
3
P
P0
P1
D
Q0
Q1
Q
3B
Distance
A vitesse constante, augmentation de la distance.
D'
Dist1
Dist0
D
D'
T0
T1
Temps
4
P
P0
P1
D'
D
Q0
Q1
Q2
Q
5
Coût du VKM
C0
C1
D'
D
VKM0
VKM1
VKM2
VKM

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

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

Une amélioration de la vitesse générale du système de transport….

Du fait de cette amélioration des vitesses, les tonnes produites dans un espace donnée pourront aller plus loin dans le même temps de transport pour un coût marginal réduit (du fait que le transport ne prendra plus longtemps, seulement les coûts liés à l'usure et au carburant augmenteront avec la distance)

Cet effet est extrêmement important, notamment quand nous comparons le coût marginal du transport avec la disposition à payer pour aller plus loin. Étant donné que la disposition à payer est fonction des ventes totales d'une entreprise du coût logistique et du changement dans le temps de transport.

…nous rend l'ouverture de nouveaux marchés possible…

Il semble clair que pour une entreprise, sa disposition à payer pour transporter plus loin et ouvrir des nouveaux marchés doit être égal à une partie fixe de ses ventes totales (soit son coût logistique fixe)

Du moment que nous considérons que aller plus loin coute juste l'essence et l'usure, normalement sa disposition à payer sera toujours plus élevé que le coût supplémentaire pour transporter une tonne plus loin.

$$DàP = VT * \alpha_{\log} * \left(n + \frac{\Delta T}{T} \right) + \left(n\sigma * \frac{\Delta \sigma}{\sigma} \right)$$

Ce double effet aura comme conséquence une réduction du prix du produit, qui aura un impact sur la demande du produit et donc de la quantité transportée. En même temps, le fait d'augmenter l'aire du marché potentiel permettra d'augmenter d'avantage les quantités requises pour saturer les nouveaux marchés.

Afin de réaliser notre analyse il nous a fallu trouver un cadre de référence officiel et rigoureux pour servir de comparatif. En 2006 le conseil Général de Ponts et Chaussées c'est livré à l'exercice de créer 4 scénarios tendanciels de mobilité qui traduisent l'évolution du système de transport en l'absence de crise majeure ou de politiques radicalement différentes de celles à l'œuvre. Aux effets de notre analyse nous avons, donc, retenu un de ces scénarios «Gouvernance mondiale et Industrie environnementale», qui est un scénario intermédiaire,

dans la palette offerte par le CGPC, du point de vue des projections de mobilité des marchandises, et nous l'utiliserons comme scénario de référence.

Dans un premier temps, nous avons voulu explorer la signification du scénario de référence pour 2050 tant sur l'organisation générale du système de transports que sur les comportements. A cet effet, la méthode adoptée pour mener cette analyse consiste à examiner les différentes façons de traduire ce scénario dans le formalisme du modèle TILT. Cet exercice nous à permis de :

- révéler les valeurs implicites du scénario de référence,
- faire ressortir différentes organisations possibles du système de transport produisant le même volume de trafic.

2.2.3.3 *Mise en cohérence des trafics globaux, des structures modales et des structures de services de transport dans TILT*

On distingue dans TILT quatre grands services de transport de marchandises :

- services de transport urbain : collecte et livraison
- services de transports régionaux : collecte et livraison, activités régionales à moins de 150 km
- services de transports de longue distance : inter-régional, export-import dans l'espace européen, à moins de 2000 km
- services de transports de très longue distance : export-import maritime et aérien à plus de 2000 km.

Les besoins de services de transports urbains et régionaux sont calculés à partir du PIB, sur la base de l'élasticité moyenne du trafic intérieur au PIB. Ces besoins sont réputés satisfaits uniquement par la route.
La vitesse des camions sur ces espaces est fortement déterminée par la nature des infrastructures ; elle varie assez peu en valeur absolue et reste globalement plafonnée par les possibilités d'extension des infrastructures les plus rapides.

Les besoins de transport de longue et très longue distance se déduisent des besoins globaux de transport et des besoins de transports urbains et régionaux. Globalement, la vitesse moyenne du déplacement des marchandises sur longue distance doit restée cohérente avec :

- d'une part, les besoins globaux de transport et la vitesse moyenne des déplacements, liée au PIB par une élasticité considérée constante dans le paradigme actuel (hors déplacements de très longue distance, qui relèvent d'une autre logique)
- d'autre part, les besoins de transport urbains et régionaux et les vitesses afférentes.

La structure du transport de très longue distance entre aérien et maritime est déterminée par la structure des échanges et la nature des produits transportés.

Il faut alors mettre en cohérence trois évolutions relatives aux services de transport de longue distance :

- les besoins de transport, liés à la structure des échanges extérieurs (la part de l'Europe)
- la vitesse moyenne de déplacement et les vitesses spécifiques de chaque mode

- la contribution maximale des transports ferroviaires à grande vitesse, du fait du déploiement des infrastructures.

Cette mise en cohérence résulte in-fine sur une structure possible du transport de longue distance par modes.

Le processus de mise en cohérence consiste :

a) à agréger les heures passées par les marchandises dans les différents modes pour les services de mobilité de longue distance (Tkm par modes / vitesse nominale des modes sur longue distance)
b) à calculer le nombre total d'heures passées par les marchandises dans les services de déplacement de longue distance (Tkm total / vitesse moyenne longue distance)
c) à rechercher l'identité des deux nombres en « jouant » d'une part sur le poids du rail conventionnel, d'autre part sur sa vitesse

Figure 8 : Exemple de mise en cohérence des vitesses et parts modales pour les marchandises longue distance dans TILT

Mise en cohérence des vitesses et de la distribution modale pour les marchandises

	2050 vitesse km/h	trafic Gtkm	heures	
Ensemble	54	425		
Route	60	344	5,7	
Rail	40	39	1,0	
Modes rapides (air, TGV,..)	200	32	0,2	
Voies d'eau	10	10	1,0	
Ensemble			7,9	54,0
				54,1
			Test de contôle	0,0

Hypothèses structurantes	
Résultats de calcul	
Test de mise en cohérence	
Reprise module précédent	

2.2.4. La quantification des scénarios de mobilité durable avec TILT

TILT donne un rôle central aux notions de temps et de vitesse dans la compréhension des dynamiques de mobilité et de répartition modale à long terme, en relation avec les grands éléments de contexte que sont la structure de la population, la productivité, l'économie et les comportements. C'est donc au travers de ces concepts de base que l'on cherchera à quantifier les scénarios de mobilité durable, tout au moins pour la partie qui ne relève pas spécifiquement de la technologie.

Les processus de mise en cohérence, tels qu'ils sont décrits ci-dessus, ne donnent pas de solutions uniques aux combinaisons d'hypothèses sur les vitesses par modes et par services et sur les parts modales par service, qui respectent l'ensemble des contraintes sur les mobilités globales et les vitesses moyennes. On détermine ainsi des « espaces de solutions » qui sont autant d'indications sur les marges de flexibilité et sur les possibilités d'arbitrage dans la définition et la mise en œuvre des politiques publiques visant à peser sur la mobilité et sa répartition modale.

Pour quantifier les scénarios de mobilité durable, il est nécessaire de prolonger la prospective des services de mobilité par une prospective des émissions. Ceci demande de calculer la consommation d'énergie du secteur transports ainsi que les émissions qui y sont associés, à partir des résultats de TILT sur les trafics par modes et catégories de service. Autrement dit, traduire les passagers-kilomètres et les tonnes-kilomètres en énergie et en tonnes de CO2.

Le sous-modèle d'émissions de TILT est formé par trois modules :

- un module qui modélise la dynamique des parcs et l'introduction des nouvelles technologies dans le parc
- un module qui ventile les trafics générés par TILT pour les différents services de mobilité selon technologies utilisées
- un module qui calcule les consommations énergétiques et les émissions à partir des descriptifs techniques des différentes technologies.

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

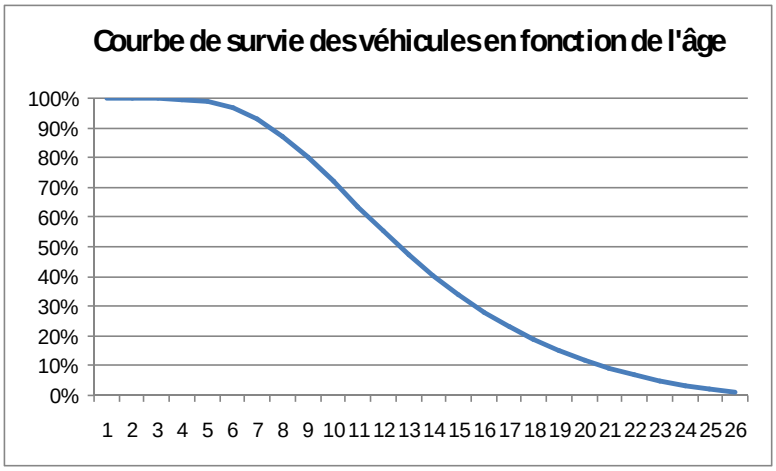
2.2.5. Module de simulation des parcs et de pénétration des nouvelles technologies

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 l'opportunité d'être flexible en matière d'évolution des technologies automotrices, leur année d'entrée dans le marché et leur rythme de diffusion. Quatre modules de simulation des parcs ont été développés : les voitures, les VUL, les bus, les autocars, les camions.

Ces modules reposent sur la simulation de deux dynamiques :

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

Figure 9 : courbe standard de survie des véhicules

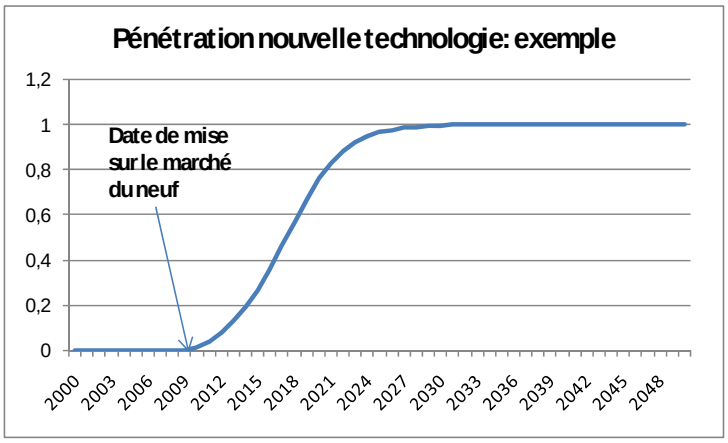


On considère quatre grandes familles de technologies pour les transports routiers :

- les véhicules équipés seulement de moteurs à combustion interne (MCI), fonctionnant avec un mélange de carburants pétroliers classiques et de biocarburants ;
- les véhicules hybrides rechargeables bi-énergie, carburants classiques / biocarburants et électricité, avec quatre niveaux d'autonomie des batteries ;
- les véhicules électriques ;
- les véhicules équipés de piles à combustibles et alimentés avec de l'hydrogène de réseau.

La règle générale de diffusion des technologies est celle d'une logistique qui s'applique d'abord aux technologies génériques : MCI, hybrides, PAC, électrique, ensuite à chaque technologie nouvelle à l'intérieur des technologies génériques (PAC avec reformeur méthanol, puis PAC avec hydrogène de réseau par exemple)[9].
On précise 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, fonction de la technologie et de son champ d'application, et les paramètres de la logistique.

Figure 10 : courbe standard de pénétration d'une nouvelle technologie



[9] Les caractéristiques techniques de ces technologies sont présentées en annexe 1.

De cette façon, le module de simulation des parcs fournit une répartition des véhicules du parc qui suit une règle de priorité primant d'abord les technologies génériques et donnant en suite priorité aux technologies à l'intérieur de chaque catégorie générique.

Figure 11 : Exemple du sous-module de dynamique des parcs

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%

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

Il a donc fallu lui adjoindre un module d'allocation qui consiste à ventiler le parc selon les différents services de mobilité, pour lesquels le kilométrage annuel et les conditions d'utilisation des véhicules sont spécifiques.

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 (2ème VP) versus véhicules multifonctions (1ère VP) ;
- pour tous les véhicules, règles de priorité pour l'allocation des technologies basées sur les capacités de stockage embarqué et sur les conditions de réapprovisionnement (densité du réseau et durée) face à la porté géographique des différents services de

mobilité : l'urbain (de 0 à 50 km), le régional (de 51-150 km), la longue distance (plus de 150 km) et la très longue distance (plus de 2000 km).

Ainsi, les véhicules électriques sont alloués automatiquement comme des véhicules répondant exclusivement aux besoins de services de mobilité urbaine.
Les véhicules à hydrogène, au GNV et les hybrides sont alloués d'abord 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, puis les hybrides.

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

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

Figure 12 : Exemple de distribution des parcs VP par technologie

Distribution des parcs Millions VP	1990	2000	2025	2050
1ère VP		**18,2**	**27,7**	**30,3**
MCI		18,2	11,7	0,0
diesel BAU		11,5	3,1	0,0
essence BAU		6,7	1,4	0,0
diesel performant		0,0	4,9	0,0
essence performant		0,0	2,3	0,0
GPL		0,0	0,0	0,0
GNV		0,0	0,0	0,0
H²		0,0	0,0	0,0
MCI / hybride rechargeable		0,0	16,2	30,3
diesel		0,0	11,8	21,2
essence		0,0	4,4	9,1
GPL		0,0	0,0	0,0
GNV		0,0	0,0	0,0
H²		0,0	0,0	0,0
PAC		0,0	0,0	0,0
GNV + réformeur		0,0	0,0	0,0
méthanol + réformeur		0,0	0,0	0,0
H²		0,0	0,0	0,0
Electrique pur		0,0	0,0	0,0
autres VP		**11,7**	**12,4**	**11,9**
MCI		11,7	1,6	0,0
diesel BAU		0,0	0,2	0,0
essence BAU		11,7	0,1	0,0
diesel performant		0,0	0,3	0,0
essence performant		0,0	1,1	0,0
GPL		0,0	0,0	0,0
GNV		0,0	0,0	0,0
H²		0,0	0,0	0,0
MCI / hybride rechargeable		0,0	6,1	3,4
diesel		0,0	3,8	2,4
essence		0,0	2,3	1,0
GPL		0,0	0,0	0,0
GNV		0,0	0,0	0,0
H²		0,0	0,0	0,0
PAC		0,0	0,0	0,0
GNV + réformeur		0,0	0,0	0,0
méthanol + réformeur		0,0	0,0	0,0
H²		0,0	0,0	0,0
Electrique pur		0,0	4,7	8,4

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

Pour les modes terrestres, le module d'allocation des véhicules-kilomètres 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, des comportements et de l'organisation qui sont déterminées par les autres modules du modèle.

Par ailleurs, pour les VP, l'allocation des Vkm par technologie tient compte de la relation entre l'âge des véhicules et leur distance annuelle moyenne de parcours.

Figure 13 : Exemple de module d'allocation des véh-km VP

	2000	2025	2050
LONGUE DISTANCE	120	140	133
MCI	120	59	0
diesel BAU	76	16	0
essence BAU	44	7	0
diesel performant	0	25	0
essence performant	0	12	0
GPL	0	0	0
GNV	0	0	0
H^2	0	0	0
MCI / hybride rechargeable	0	82	133
diesel	0	60	93
essence	0	22	40
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
REGIONAL	94	163	200
MCI	94	54	0
diesel BAU	36	13	0
essence BAU	58	6	0
diesel performant	0	21	0
essence performant	0	14	0
GPL	0	0	0
GNV	0	0	0
H^2	0	0	0
MCI / hybride rechargeable	0	90	160
diesel	0	63	112
essence	0	27	48
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
URBAIN	181	258	236
MCI	181	86	0
diesel BAU	70	21	0
essence BAU	111	9	0
diesel performant	0	33	0
essence performant	0	22	0
GPL	0	0	0
GNV	0	0	0
H^2	0	0	0
MCI / hybride rechargeable	0	143	189
diesel	0	100	132
essence	0	43	57
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	31	47

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

Les hypothèses principales de ce calcul de mouvements sont :

- taux de remplissage moyen des aéronefs selon le type d'aéronef (nous considérons trois types d'aéronefs différents pour chaque zone de service)
- distance moyenne parcourue par type d'aéronef et zone de service
- nombre de tonnes chargés et déchargées par mouvement et type de navire (vrac solide, 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 prendre en compte des changements en matière de comportements et d'organisation.

Figure 14 : Capture du module d'allocation de mouvements maritimes

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

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

Le module de calcul des consommations et des émissions travaille à partir des données fournies par le module de répartition du parc de véhicules et des véhicule-kilomètres. La répartition des véh-km est croisée avec les données de consommation et d'émissions spécifiques, relatives à chaque mode, chaque technologie, chaque zone de service, pour déterminer, dans le module « énergie-émissions », la consommation d'énergie des véhicules ainsi que les émissions liés 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 de rendre compte de l'évolution des performances énergétiques et environnementales liée aux prescriptions européennes et à l'évolution technique historique.

Pour les hybrides rechargeables, on pend en compte un pourcentage d'électricité de réseau, défini en fonction de 2 critères :

- l'autonomie supposée des batteries (exprimée en km par recharge)
- le service de mobilité.

Le module de calcul des émissions inclut un sous-module de calcul des émissions indirectes mobilisées dans l'ensemble des filières auxquelles appartiennent les technologies, du puits à la roue. On distingue quatre grandes filières dans ce sous-modules :

- la production des carburants pétroliers conventionnels
- la production des biocarburants
- la production-distribution de l'électricité de réseau
- la production-distribution d'hydrogène.

Pour chaque filière, on comptabilise les énergies fossiles mobilisées et les rendements de transformation et de transport-distribution.

Figure 15 : Exemple de récapitulatif du module émissions directes

Energie & Emissions	BUS ET CARS			
	2000	2025	2050	
Total				
Passagers- km [Gtkm/an]	43	56	61	
Vehicule-km [Gvkm/an]	2,4	3,1	3	
Energie				
essence [mill m3 /a]	0,0	0,0	0,0	
Gazole [mill m3 /a]	0,9	0,5	0,3	
GPL [mill t /a]	0,0	0,0	0,0	
GNV [TWh PCI /a]	0,0	0,0	0,0	
Méthanol [mill m3 /a]	0,0	0,0	0,0	
H^2 [TWh PCI /a]	0,0	0,0	0,0	
Elec (TWH/a]	0,0	0,4	0,7	
Emissions				Facteur
CO2-em [1000*t/a]	2380	1207	740	3,2
NOx-emissions [t/a]	36298	6157	4812	
VOC-emissions [t/a]	9068	579	346	
PM-emissions [t/a]	2594	61	42	

	VP et VUL/VP			
	2000	2025	2050	
Total				
Passagers- km [Gtkm/an]	715	708	678	
Vehicule-km [Gvkm/an]	394	522	506	
Energie				
essence [mill m3 /a]	17,8	4,1	0,7	
Gazole [mill m3 /a]	11,0	8,2	3,2	
GPL [mill t /a]	0,0	0,0	0,0	
GNV [TWh PCI /a]	0,0	0,0	0,0	
Méthanol [mill m3 /a]	0,0	0,0	0,0	
H^2 [TWh PCI /a]	0,0	0,0	0,0	
Elec (TWH/a]	0,0	21,5	35,0	
Emissions				Facteur
CO2-em [1000*t/a]	69569	28814	10490	6,6
NOx-emissions [t/a]	112114	41888	39818	
VOC-emissions [t/a]	77747	6989	4014	
PM-emissions [t/a]	9209	58819	31303	

Le sous-modèle d'émissions fournit une répartition précise des trafics inhérents à chaque scénario de mobilité selon les technologies utilisées, et les consommations d'énergie et les émissions qui y sont liées, pour chaque type de services de mobilité et chaque mode.

Couplé au sous-modèle de projection des trafics, il constitue un moyen très puissant pour explorer les différentes voies possibles pour arriver, entre autres, à une division par 4 des émissions de CO2.

L'utilité analytique du module repose sur sa capacité à pendre en compte de manière flexible l'influence des technologies par rapport à leur année d'arrivée sur le marché et leur plus ou moins grande facilité à pénétrer dans le marché.

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

En outre, le module de calcul d'émissions permet aussi de calculer la consommation de carburant des modes maritimes et des modes aériens et les émissions inhérentes à cette consommation.

Le fait de pouvoir calculer le nombre de mouvements nous permet de seulement comptabiliser la consommation et les émissions liées aux ressortissants français et les tonnes en provenance ou à destination de l'économie française.

3 Partie 2 : Définir et quantifier les scénarios de mobilité durable

On s'intéresse ici à deux aspects majeurs de la définition et la quantification des scénarios de mobilité durable :

- comment les situer par rapport aux évolutions « tendancielles » ?
- comment articuler la définition conceptuelle et qualitative de ces scénarios et la modélisation pour aboutir à une quantification ?

3.1 Partir d'un scénario « tendanciel »

3.1.1. Quel sens donner à un scénario tendanciel

La quantification d'un scénario dit « tendanciel » faisait partie des termes de référence de l'étude. Elle visait non pas tant à produire une vision tendancielle du système de transport et de ses émissions à long terme, mais plutôt à proposer des points d'appui pour la quantification des scénarios de mobilité durable.

On peut en effet s'interroger sur la notion même de scénario tendanciel sur un horizon aussi lointain que 2050, alors même que l'on sait que les contraintes du côté des ressources pétrolières et des problèmes climatiques imposeront inévitablement au système des transports des ruptures par rapport aux tendances historiques.

En revanche, comme l'on l'a dit plus haut, cette recherche sur les scénarios de mobilité durable ne vise pas à apporter une réponse exhaustive à la question de l'ensemble des déterminants à long terme de la mobilité globale des personnes et des marchandises. Elle vise plus spécifiquement ceux qui ont trait à l'usage du temps, à la vitesse et à leurs conséquences sur les structures modales, lesquels constituent autant de leviers des politiques publiques en vue de la mobilité durable. Il était dés lors nécessaire de resituer cette recherche dans le contexte d'une vision de la dynamique à long terme de la mobilité des personnes et des marchandises par rapport à laquelle on pouvait expliciter et instrumentaliser les variables liées au temps et aux vitesses. C'est cette vision que l'on qualifie de « scénario tendanciel ».

Pour simplifier l'exercice, on a convenu de repartir de travaux récents de prospective à long terme des transports, à savoir ceux menés par le CGPC[10] en 2006 dans lequel nous avons retenu le scénario central S1 « Gouvernance mondiale et industrie environnementale ».
L'objectif visé ici est de traduire, dans le langage et le formalisme de TILT, les hypothèses explicites et les projections de trafics de personnes et de marchandises à 2050 du CGPC, globalement et par modes.

L'analyse des résultats de cette quantification du scénario tendanciel est axée autour de deux interrogations majeures :

- quelles sont les hypothèses structurantes de la mobilité à retenir en tout état de cause dans les scénarios de mobilité durable ?
- quelles inflexions par rapport aux fondamentaux sur les variables-clé ? L'usage du temps et les vitesses sont-ils considérées explicitement ou implicitement dans les projections tendancielles ?

[10] « Démarches Prospective Transports 2050, Eléments de réflexion » avril 2006, rapport du Conseil général des ponts et chaussées

3.1.2. Les éléments du contexte macro-économique et démographique

Concernant les éléments de contexte, le scénario tendanciel reprend, dans toutes ses configurations, les éléments du scénario intermédiaire du CGPC. Ces derniers sont définis dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Eléments de contexte

Contexte 2050	PIB 2002-2050	1,5% par an
	population métropole	67 millions d'habitants
	solde migratoire annuel	

Les hypothèses de population reprennent le scénario tendanciel de l'INSEE publié en 2001. Ce dernier a depuis été révisé à la hausse en juillet 2006 et prévoit un scénario central de 70 millions d'habitants[11]. Après discussion, nous avons conservé la projection de 67 millions afin d'une part, de rester cohérent avec le scénario tendanciel CGPC et d'autre part, afin de maintenir la cohérence interne entre les projections de trafics et la population retenues dans ce même scénario (tableau ci-après pour les trafics).

3.1.3. Trafics globaux de passagers, structures modales et structures de services de mobilité dans une vision tendancielle

3.1.3.1 Trafics globaux passagers.

Pour pouvoir servir de point d'appui à la quantification des scénarios de mobilité durable avec TILT, le volume de trafic de référence du CGPC (1555 Gpkm en 2050) doit être corrigé sur deux points :

- les trafics des résidents français pour des vols européens et internationaux (estimés en 2000) sont réintégrés afin de capter dans les projections, les pollutions transfrontières générées par les résidents français.
- à l'inverse, les trafics interurbains générés par les résidents étrangers, relevant de la responsabilité de leur pays d'origine, sont exclus.

Le volume de trafic de référence intégré dans TILT pour 2050, cohérent avec la projection CGPC, s'établit ainsi à 1450 Gpkm.

Le tableau ci-dessous présente les modalités de calcul des trafics passagers pour le scénario de référence.

[11] INSEE Première, juillet 2006, n°1089

Tableau 2 : Trafics passagers en 2050 dans le scénario S1 du CGPC

volume total de trafic passager dans la variante S1 CGPC.	1554,5 Gpkm
volume total de trafic passager **déduit** du trafic des étrangers en interurbain (194 Gpkm en 2050 (S1))	1360,5 Gpkm
volume total de trafic passager en 2000 **complété** par le trafic des français en avion hors des frontières (le CGPC prend en compte les seuls trafics nationaux en avion soit 15 Gpkm)	77 Gpkm (monde) 12 Gpkm (Europe)*
volume **total** de trafic passagers considéré comme référence dans VLEEM pour 2050	1449,5 Gpkm

** Etude ADP 2000, p.33*

Le trafic passager du scénario de référence « Gouvernance mondiale et industrie environnementale » (1450 Gpkm) conduit à une augmentation de 50% de la mobilité totale pour les passagers relativement au niveau de 2002 (959 Gpkm). Cette progression de la mobilité est à mettre en parallèle d'une part, avec celle du PIB (en hausse de pratiquement 100% soit un doublement) sur la même période et d'autre part, celle de la population française métropolitaine qui augmentera de 13% sur la même période (en restant sur la projection de 67 millions d'habitants).

D'un côté, le scénario tendanciel opère un découplage relatif de la mobilité avec le PIB puisque la mobilité augmente deux fois moins vite que le PIB. D'un autre côté, ce même scénario nous conduit à une augmentation de la mobilité 3.8 fois plus rapide que la croissance de la population dans un contexte qui pourtant sera marqué par le vieillissement des populations.
Notons également que qu'il s'agit du scénario intermédiaire du CGPC. Le scénario 2 de « Repli et Déclin Européen » retient une moindre croissance du trafic de 21%. Le scénario 3 de la « Grande Europe Economique retient une croissance supérieure de 73%.

3.1.3.2 Les évolutions tendancielles des structures modales

Il s'agit de préciser ce qui relève de tendances lourdes avec faible incertitude et faible maîtrise. A cet effet, tout comme le CGPC, nous considérons comme relevant du tendanciel dans le scénario de référence, un effet de structure naturel en faveur des modes rapides et en défaveur des modes lents. Il se traduit par :

- une progression des vitesses sur les modes rapides. Les vitesses moyennes retenues pour 2050 sont respectivement de 500 km/h pour l'avion et de 250 km/h pour le TGV.

- une progression des parts de marché des modes rapides. Le CGPC retient un taux de croissance du trafic aérien de 1,4% par an dans ce scénario ; ce qui conduit à un doublement du trafic aérien sur la période en phase avec l'évolution du PIB.

Tableau 3 : Trafics et parts de l'aérien en 2050 dans le scénario tendanciel

	2002	**2050**
croissance du trafic aérien (S1 CGPC) (100=2002) (1.4% / an)	100	194
trafic correspondant (Gpkm passagers)	104*	202
Part modale de l'avion dans le total Gtkm passager**	11%	13,7%

* Mobilité des résidents français à l'intérieur et hors des frontières nationales. Se décompose en 15 (France), 12 (Europe), 77 (monde). source Etude ADP 2000. ** La part modale de l'avion est de 2% si l'on considère les seuls déplacements intérieurs (15/862) et 11% en intégrant les déplacements des français en dehors des frontières (104/951).

3.1.3.3 Les hypothèses de décroissance des vitesses automobiles

Le scénario CGPC fournit l'évolution des vitesses de la voiture particulière et des transports collectifs en taux de croissance annuel pour 2050 selon les différentes zones pour le scénario S1 intermédiaire :

Tableau 4 : Vitesses des déplacements passagers dans le scénario tendanciel

	vitesses		Valeurs 2000	Valeurs 2050
Hypothèses vitesses VP	*urbain*	tcam	Km/h	Km/h
	Vp	-0,6%/an	23	17
	Tc	0,2% / an	20	22
	région			
	Vp	-0,4%/an	58	48*
	Tc	0,2%/an	58	64
	inter-région			
	Vp	115 km/h		115

** valeur basse CGCP ne prenant pas en compte la hausse de la part des trafics régionaux réalisés sur voie rapide.*

Nous constatons que dans le scénario de référence CGPC, la baisse des vitesses en VP en 2050 est effective sur l'ensemble des zones y compris sur l'autoroute. A l'inverse, les vitesses des modes collectifs progressent aussi bien en urbain qu'en région. De ces hypothèses découle une inversion du différentiel des vitesses en faveur des modes collectifs et en défaveur de la VP par rapport à l'année de référence. Les voitures particulières deviennent moins rapides (en moyenne) que les TC en 2050. Ces hypothèses de vitesse semblent prolonger l'inflexion des vitesses constatée sur routes et en ville en France depuis quelques années.

3.1.3.4 Paramètres additionnels pris en compte par TILT

Les éléments fondamentaux du scénario tendanciel étant posés (PIB, population, volume global de trafic, croissance des vitesses), le modèle TILT ajoute trois paramètres permettant de compléter le scénario de référence mais aussi d'apprécier sa cohérence :

1. **une contrainte de temps moyen sur les déplacements effectués quotidiennement sur l'ensemble des modes.**

La contrainte de temps moyen de transport est fondée sur la conjecture de Zahavi, selon laquelle le temps passé en déplacement connaît une forte régularité dans le temps et dans l'espace ; cette moyenne étant de 1 heure par jour et par personne. Le respect de cette contrainte dans le scénario de référence est fondamental car il garantit la mise en cohérence de trois principaux éléments du système de transport :

- *le volume total de trafic projeté en 2050 ;*
- *les modes de vie (et les arbitrages temporels sur les programmes d'activité correspondant dont le transport) ;*
- *les vitesses de transports disponibles sur les différents modes en 2050.*

2. **un niveau de kilométrage annuel moyen réalisé par les véhicules particuliers en circulation.**

Il s'agit d'une part de maintenir la cohérence entre le trafic total tous modes, le trafic total VP, et les budgets temps. D'autre part, il s'agit de comparer les kilométrages moyens par véhicules en 2050 avec ceux de 2002. Notons sur ce point la tendance à la baisse des kilométrages annuels moyens des véhicules particuliers en France de 12 374 km/an en 2001 à 12 076 en 2006[12].

3. **l'extrapolation de la structure de la mobilité selon les différentes zones (urbain, région, inter-région).**

Il s'agit de la ventilation des trafics sur les différentes zones (urbain, région, inter-région) exprimé en km/an/personne. La structure des trafics selon les zones est fondée sur la nomenclature des ZPIU en 2000 et extrapolée à 2050 de manière exogène de la façon suivante :

- **urbain (< 50 km)** : hausse de 20% du niveau moyen de mobilité individuelle entre 2000 et 2050.
- **régional (<=150km)** : hausse du niveau moyen de mobilité de 0,9%/an en moyenne de 2000 à 2050
- **inter-régional (> 150 km)** : le volume de trafic en inter-régional est calculé comme la différence entre la mobilité globale 2050 (source CGPC) et les mobilités urbaine et régionale.

[12] Énergie et matière premières : « Consommations de carburants des voitures particulières en France », à partir du panel carburant TNS worldpanel, décembre 2007.

3.1.3.5 Les éclairages de TILT sur le scénario de référence

L'intégration du scénario de référence CGPC dans le formalisme de TILT met en lumière deux interrogations principales : la première porte sur la valeur de d'élasticité vitesse/PIB contenu implicitement dans la référence ; la deuxième découle de la première et porte sur la vitesse de la voiture et sa place dans le système de transport en 2050.

A un premier niveau d'équilibre sont confrontées les *seules* hypothèses de contexte, (PIB et population), et le trafic de référence (1449,5 Gpkm passagers) dans l'hypothèse du maintien de la constance de Zahavi. Ce premier niveau révèle une élasticité de la vitesse moyenne des déplacements à la croissance du PIB de 0,37 points soit 4 points au dessus des valeurs historiques moyennes constatées (cette élasticité est à différencier de l'élasticité des trafics au PIB).

Le scénario de référence CGPC S1 suggère par conséquent un prolongement des tendances passées en matière de hausse de vitesse. Sur ce point, on peut se demander s'il peut y avoir cohérence avec les jeux d'hypothèses réalisées par le CGPC sur les VP ? En l'occurrence, une élasticité vitesse/Pib en maintien tendanciel est-elle compatible avec un ralentissement des vitesses VP ? Sachant que la VP compte pour une part importante des trafics totaux (90% en urbain et en région) et par conséquent pour une part importante dans la baisse de la vitesse moyenne globale ?
La hausse de la vitesse globale de transport impliquerait dés lors qu'une part croissante des distances soit effectuée sur les modes rapides de manière à tirer cette vitesse moyenne des déplacements vers le haut ce qui est effectivement envisagé.

Les questions se posant alors sont les suivantes :

- peut-on avoir de manière cumulée, croissance des trafics automobiles et croissances des modes rapides (TGV, Avion) ?
- la voiture peut-elle alors maintenir son kilométrage annuel moyen actuel (autour de 12 à 13000 km) tout en roulant moins vite en urbain en région et en longue distance et face à des modes collectifs plus performants ?
- ces tendances sont-elles compatibles avec la stabilisation des budgets temps de transport ?

La question du maintien de la place de la voiture dans le système de transport en 2050 à son niveau actuel pose donc question. Restaurer la compatibilité entre les trafics de la voiture en 2050 et les hypothèses de décroissance des vitesses supposerait :

- soit pour ne pas violer la constance de Zahavi, d'opérer un basculement de trafic plus significatif sur les modes rapides, ce qui implique une croissance encore plus soutenue de ces modes pour absorber le trafic retiré à la VP dans les zones ou elle se trouve en position de faiblesse (urbain et longue distance). On alors peut se demander si la croissance soutenue des modes rapides, nécessaire pour satisfaire la constance des budgets temps, n'en devient pas artificielle et si la structure de la mobilité par zone qui en résulte reste cohérente. Cette première piste nous mènera au scénario Pégase dans lequel la part de la VP reste importante alors que les modes rapides se développent.
- soit de remettre en cause la conjecture de Zahavi. Cette deuxième piste sera explorée dans le scénario Chronos.
- soit à questionner le niveau de trafic global de référence projeté en 2050 pour les passagers dans le scénario S1 (1449 Gpkm) et la hausse de 50% par rapport à l'année

de référence alors même que les vitesses sur route sont en décroissance. Cette troisième piste sera explorée dans le scénario Hestia.

3.1.4. Trafics globaux des marchandises, structures modales et structures de services de transport dans le scénario tendanciel

3.1.4.1 Tendances sur la distribution spatiale de la production

Aujourd'hui nous sommes témoins d'une redistribution massive de la capacité industrielle des pays industrialisés vers les pays en voie de développement qui ont une main d'œuvre moins couteuse. Des nombreuses entreprises françaises se sont délocalisées dans ces pays et le secteur manufacturier a été forcé de choisir entre la délocalisation de l'appareil productif ou la fermeture à cause d'une concurrence accrue.

Cette tendance s'est accélérée dans les années récentes, notamment avec l'entrée de la Chine dans l'OMC et la libéralisation de plusieurs marchés de l'ancien bloc soviétique où la main d'ouvre moins est moins couteuse.

De facto, cette situation s'est traduite par une forte croissance des importations ainsi que du trafic de transit. Les délocalisations des usines ont conduit à une substitution des importations au produit de proximité. Et, ces remplacements ont profondément changé les réseaux d'approvisionnement en amont et en aval.

Les importations de biens manufacturés ont fortement augmenté en France ; les trajets concernant les matériaux de base ont diminué et, en conséquence, le transport lié à la production de produits a connu une stabilisation. En revanche le transport de produits finis a fortement augmenté et une grande partie de cette croissance a été absorbée par le transport routier.

3.1.4.2 Trafics globaux marchandises

Le scénario « Gouvernance mondiale et Industrie environnementale » du CGPC, pris en référence, correspond à un trafic total de 525 GTkm pour l'ensemble des modes transportant des marchandises.

Ce scénario a été traduit dans le formalisme de TILT à l'aide de quatre variables clés

Croissance du PIB : 1,5%
Population de la France en 2050 : 67 millions
Elasticité Tkm/Pib de : 0,63
Elasticité Tkm/CE de : 1,6

3.1.4.3 Répartition modale du trafic marchandises tendanciel

La répartition modale de référence indiquée dans le scénario du CGPC est atteinte avec une croissance économique moyenne de 1,5% et une élasticité vitesse/PIB égale à celle observée historiquement jusqu'en 2025. Après 2025, le besoin croissant en matière de vitesse résultant

de cette élasticité pousse le trafic des modes les plus lents vers des modes plus rapides, au-delà de ce qui est pris en compte dans les projections CGPC, avec comme conséquence :

- ou bien un changement de la répartition modale qui favorise l'avion et le rail rapide en 2050
- ou bien une remise en cause de l'élasticité vitesse-PIB.

Répartition modale en 2025 :	82% Route 12% Rail 2% « Fast modes » 4% Navigation Intérieure
Répartition modale en 2050 :	74% Routier 11% Rail 10% « Fast modes » 4% Navigation Intérieure

3.1.4.4 Spécifications des modes maritime et aérien.

Afin de pouvoir inclure dans notre analyse la consommation de carburant des activités export et import de l'économie française ainsi que les émissions liées, nous avons dû calculer le trafic maritime et aérien pour les marchandises en provenance ou à destination du marché français. 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).

Une fois ces trafics calculés 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 destinées principalement au transport de passagers à été pris en compte et sa part de la consommation de carburant et des émissions liées a été correctement alloué au volet marchandises. En ce qui concerne le transport maritime, nous avons calculé uniquement la part de la consommation de carburant et la part des émissions directement imputables aux marchandises françaises.

3.2 Du scénario « tendanciel » aux scénarios de mobilité durable

La construction du modèle TILT (*Transport Issues in the Long Term*) avait d'abord pour but de développer les dimensions « transports », encore peu élaborées dans le modèle VLEEM. Ce dernier a donc servi de matrice à la nouvelle modélisation. Mais le but essentiel du modèle TILT est de nous donner des éléments de réponse aux questions concrètes que pose le développement de la mobilité à l'horizon 2050, sous contrainte du facteur 4. Se projeter à cet horizon suppose de ne pas s'en tenir à une simple prévision plus ou moins fondée sur ce que nous ont enseigné les tendances passées.

Construire des scénarios de mobilité durable respectant le facteur 4 oblige à s'engager dans une démarche prospective ouverte d'emblée à la pluralité des futurs possibles. En ce sens,

nous devons proposer des situations contrastées en 2050 et les diverses trajectoires qui peuvent y conduire. Comme nous y invite la notion de prospective, nous allons donc élaborer des scénarios. D'une certaine façon, nous devons inventer des « histoires ». Mais pour ne pas le faire en se racontant des histoires, c'est-à-dire en construisant des scénarios incohérents, la présence d'un modèle relève de la prudence, sinon de l'impératif catégorique. La construction de TILT (objectif de la première partie) était de répondre à cette exigence. On va ici s'appuyer sur la rigueur du modèle TILT pour faire émerger des scénarios cohérents.

Sur cette base, l'élaboration de scénarios « facteur 4 » est en première analyse un travail relativement aisé. L'objectif étant connu, diviser par 4 des émissions de gaz à effet de serre, il « suffit » de remonter la flèche du temps depuis l'horizon 2050 pour faire émerger les passages obligés de la trajectoire optimale. Mais dès qu'il s'agit de concrétiser ce programme de travail, les difficultés surgissent.

- d'abord, quelle serait la situation en 2050 avec une simple prolongation des tendances passées en matière de mobilité, et pourrait-on concevoir de réduire par 4 les émissions de CO2-énergie des transports dans un tel contexte grâce à la technologie? La famille des scénarios Pégase, qui épouse étroitement les contours du scénario tendanciel esquissé plus haut, tout en restaurant une cohérence intrinsèque plus forte, va répondre à cette question.
- ensuite, même si nous trouvons des scénarios où il est possible de respecter, au moins dans certains secteurs du transport, la contrainte du facteur 4, il n'y a pas qu'une seule façon d'atteindre l'objectif. C'est pourquoi nous présentons trois familles de scénarios illustrant trois logiques socio-économiques et politiques différentes. Pour chaque famille de scénario, nous nous intéresserons aux trajectoires, les plus favorables, mais aussi celles qui se solderaient par l'impossibilité d'atteindre l'objectif ;
- enfin, la vie économique et sociale des sociétés modernes n'est pas soumise à la seule contrainte du facteur 4. D'autres forces se manifestent, celles notamment qui incitent, voire qui souhaitent le développement de la mobilité, jusqu'à présent considérée comme le signe et le fruit de la croissance économique. Elles peuvent conduire à multiplier les obstacles qui se dresseront devant les politiques cherchant à atteindre l'objectif « facteur 4 ». Nous ne ferons donc pas des scénarios iréniques. Nous soulignerons au contraire les difficultés qu'ils supposent.

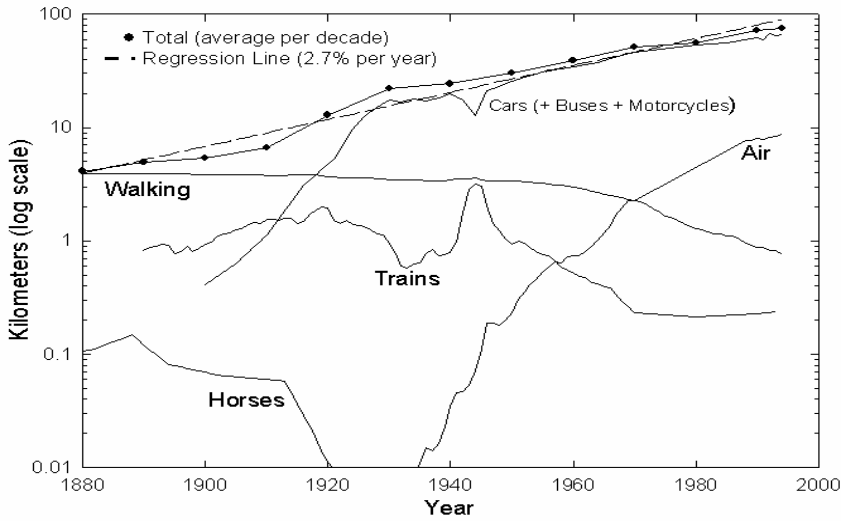
Pour reprendre le vocabulaire de Gregory Bateson, notre travail de prospective s'inscrit donc dans une logique de double contrainte (*double bind*) ou double injonction. Comment se diriger vers le respect de la contrainte facteur 4 sans pour autant remettre en cause les effets bénéfiques de la croissance économique ? Et si, comme l'énonce explicitement la notion de développement durable, nous ajoutons la contrainte sociale et les considérations d'équité, nous sommes de fait confrontés à une triple contrainte ! Il ne s'agit donc pas de construire des scénarios « rêvés », où le respect de la contrainte du facteur 4 serait obtenue par quelque coup de baguette magique technologique (le progrès), économique (la crise), politique (des décisions courageuses) ou socio-culturel (de nouveaux modes de vie). Il est tout au contraire indispensable de s'interroger autant sur les rigidités que sur les marges de manœuvre propres à ces variables. Ce qui est plus pertinent que de supposer le problème résolu par un changement proprement « tombé du ciel ». Pour cela, nous allons intégrer ces variables dans une trame analytique générale dont émergeront les grandes familles de scénarios (3.2.1). Nous prendrons ensuite le temps d'interroger de façon détaillée chaque famille de scénarios (3.2.2). Nous nous intéresserons d'abord à la famille Pégase, qui s'inscrit peu ou prou dans la poursuite des tendances actuelles, ensuite aux familles de scénarios Chronos et « Hestia ».

Dans ces trois familles, les transports de voyageurs et de marchandises seront abordés conjointement.
Enfin (3.2.3), nous nous pencherons plus spécifiquement sur la façon de caractériser et d'évaluer les politiques publiques emblématiques de ces familles de scénarios.

3.2.1. La trame générale des scénarios

Une des concrétisations les plus nettes de la croissance économique des deux derniers siècles est le développement de la mobilité. Comme le rappelle le graphique ci-dessous, illustrant le cas nord-américain, une corrélation forte existe entre croissance économique et mobilité. Ce couplage se manifeste par une progression régulière des distances parcourues annuellement (+2,7% par an). Mais il est ici important de rappeler que cet accroissement des passagers-kilomètres s'est fait avec une quasi-constance des budgets temps de transport (BTT) du fait d'une augmentation des vitesses moyennes : un mécanisme fondé sur la substitution progressive des modes rapides comme le train, puis l'automobile, aux modes lents comme la marche à pied. On remarque sur la figure ci-dessous que la distance quotidienne moyenne parcourue par un Américain est passée de 4km en 1880 à près de 80km au début des années 90. Une multiplication par 20 qui correspond précisément à une croissance de 2,7% par an sur 113 ans.

Figure 16 : Evolution des distances parcourues en km par personne et par jour depuis 1800 aux Etats-Unis



Source : AUSUBEL J.H., C. MARCHETTI, P.S. MEYER, [13]

Avec le développement de modes de transports rapides, les politiques publiques ont été et sont encore aimantées par les gains potentiels de vitesse des nouvelles technologies. Un train au XIX° siècle, une autoroute, ou l'élargissement d'une route nationale au XX° siècle, font faire à l'accessibilité aux territoires un véritable bond. La zone accessible, et donc l'univers de choix, pour acheter ou écouler des marchandises, pour se loger, se distraire ou pour chercher

[13] AUSUBEL J.H., C. MARCHETTI, P.S. MEYER, 1998, Toward green mobility : the evolution of transport, European Review, Vol. 6, N. 2, pp.137-156.

un emploi, s'étendent sensiblement dès que l'on se dote de modes de transport rapides. Mais aujourd'hui, cette tendance à l'accroissement des vitesses pour « faire gagner du temps » aux voyageurs ou aux marchandises se heurte, dans le domaine routier notamment, au développement de la congestion. Surtout dans les zones denses où les nouvelles infrastructures sont difficiles et coûteuses à mettre en place. Il est important de tenir compte de ces contraintes physiques et économiques dans le scénario tendanciel. Les questions environnementales ne sont en effet pas les seules à interpeller la tendance séculaire à la hausse de la mobilité des personnes et des marchandises. Aussi, avant de présenter les principaux choix qui nous ont conduits à présenter trois familles de scénarios, nous devons rappeler les faits qui remettent en cause la tendance générale à la progression de la mobilité. Puis nous verrons comment ces contre-tendances pourraient progressivement se renforcer avant d'en tirer une première esquisse de nos trois grandes familles de scénarios.

3.2.1.1 *Mobilité des personnes et des marchandises : la montée des contraintes*

Dans les zones urbaines denses, et dans la plupart des zones soumises à la congestion (axes lourds de transport de marchandises ou de passagers, aéroports…), des inflexions sont en cours, tant dans les pratiques que dans les règles du jeu. Les politiques publiques cherchent de plus en plus à réguler les flux, et pas seulement à leur offrir des infrastructures nouvelles. Ainsi, dans les villes européennes mais aussi asiatiques, tout se passe comme si les élus avaient cessé de tout miser sur l'automobile en investissant fortement dans les transports en commun. Sans être toujours plus rapide que l'automobile, ces derniers ont dans les zones denses le grand intérêt d'assurer des débits horaires supérieurs aux voiries routières. Ainsi, pour montrer que fiabilité et vitesse étaient désormais l'apanage des transports collectifs, de nombreuses agglomérations ont fait en sorte de contenir, voire de réduire la vitesse moyenne des automobiles en ne cherchant pas à diminuer la congestion. En première analyse pour des raisons de sécurité routière et d'environnement, mais en fait surtout pour mettre fin à la spirale qui fait qu'un investissement routier additionnel se traduit en peu de temps par un trafic supplémentaire et une congestion persistante (voir la conjecture de Mogridge[14]).

Avec ces exemples, essentiellement pris en milieu urbain, mais que l'on retrouve aussi, notamment en France sur les routes et autoroutes, nous voyons bien que l'automobile semble avoir atteint ses limites. Sans être rejetée ou obsolète, elle est confrontée aux limites que lui impose son succès. Limites qui se concrétisent aujourd'hui par des contraintes institutionnelles et réglementaires (vitesse, normes sur les émissions de polluants, restriction d'usage…). Un durcissement réglementaire que l'on retrouve également en matière de transport routier de marchandises, là encore, du fait même de sa position dominante dans le transport de marchandises.

Mais des contraintes économiques croissantes pèsent également sur la mobilité des personnes et des marchandises. Cela provient de la hausse du prix des carburants qui touche le transport routier mais aussi le transport aérien. On peut également citer la lente diffusion des pratiques de tarification de la voirie routière. Ainsi, des villes ont mis en place un péage urbain (Singapour, Londres, Stockholm, Oslo, Bergen, Trondheim, Milan…). En première analyse, l'objectif n'est pas le même que précédemment. Dans la zone de péage, il s'agit de

[14] L'anglais Mogridge a expliqué dans les années 70 pourquoi, en zone urbaine, tout investissement routier a tendance à dégrader tendanciellement les vitesses moyennes des automobiles car l'offre d'infrastructure stimule la demande au-delà de ce que permettent les nouvelles capacités, tout en conduisant dans le même temps à une dégradation de l'offre en transports en commun.

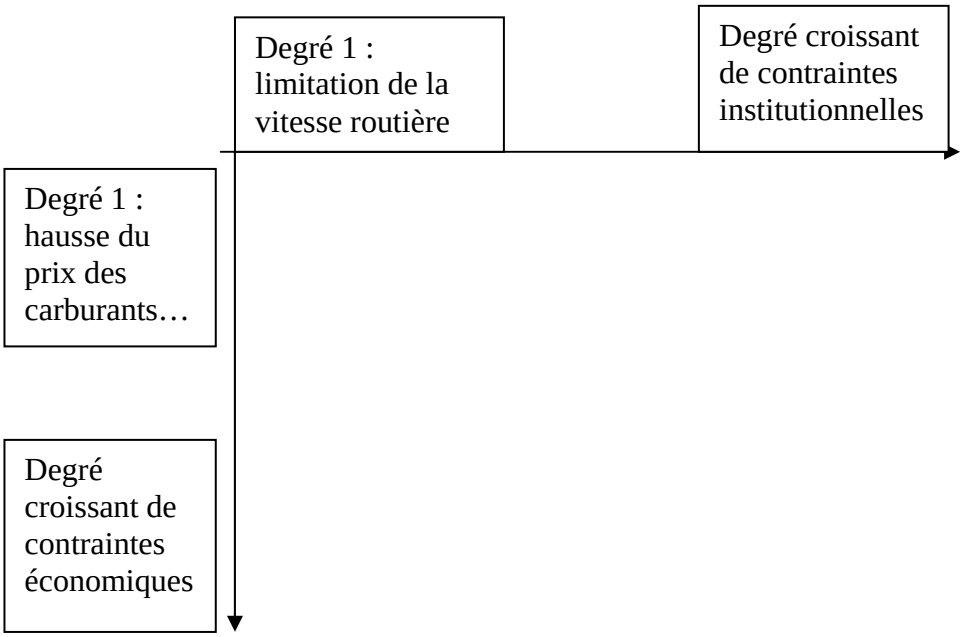
maintenir une certaine fluidité et donc une vitesse garantie pour les déplacements automobiles. Mais cette possibilité n'est disponible que pour une partie réduite de la population. Pour le plus grand nombre, ce sont les transports collectifs qui sont appelés à garantir l'accessibilité aux aménités urbaines.

En élargissant ce constat à l'ensemble des modes de transport, nous disposons d'une grille de lecture globale des contraintes potentielles auxquelles sera confrontée dans les années à venir la mobilité des personnes et des marchandises. Ce faisant, nous mettons en lumière le fait que le premier facteur conduisant à des ruptures de tendances ne résulte pas d'un choc externe comme la hausse des prix du pétrole ou une récession économique. Le cœur de notre raisonnement est le suivant : même dans une perspective économique optimiste, par exemple une poursuite de la croissance économique tendancielle (en France, 1,5 à 2% par an d'ici à 2050), la progression indéfinie de la mobilité des personnes et des marchandises se heurtera à des contraintes que nous regroupons en deux grandes catégories.

- La première relève plutôt de l'analyse micro-économique des choix. Pour reprendre le vocabulaire des économistes des transports, tout déplacement engendre pour la personne ou la marchandise qui se déplace un coût dont les deux composantes clés sont d'une part le coût monétaire et d'autre part le coût temporel, lié au temps passé (perdu ?) lors du déplacement. Mais la mobilité n'engendre pas que des coûts, elle procure également des avantages dont on peut supposer qu'ils sont souvent supérieurs aux coûts supportés. S'interroger sur le devenir de la mobilité suppose donc de se demander comment pourrait évoluer la relation entre le coût généralisé des diverses formes mobilité et les avantages que procurent les déplacements. Or, le coût généralisé ne tient pas seulement compte du prix du transport, mais aussi du temps passé et donc de la vitesse, laquelle dépend beaucoup de décisions collectives et non pas individuelles.
- La seconde catégorie tient donc compte d'un autre effet de la mobilité, non pas individuel mais social. Si, choisir un déplacement est un acte individuel, l'agrégation de ces décisions conduit à des phénomènes collectifs que les autorités publiques doivent prendre en compte. Pour cela, elles recourent à diverses contraintes institutionnelles qui peuvent jouer tant sur l'espace de la mobilité (infrastructures, voiries..) que sur les conditions d'usage (vitesse, normes de sécurité..) ou même le rationnement de certaines quantités (restrictions d'usage…). Bien évidemment, pour répondre aux contraintes collectives nées de la mobilité, les politiques publiques peuvent aussi jouer sur les leviers économiques (taxes, péages…).

L'articulation entre choix individuels et choix collectif nous invite donc à mettre en relation dynamique contraintes économiques et contraintes institutionnelles. Car le jeu de ces contraintes est au cœur de la nouvelle donne des pratiques et des politiques de mobilité. Les années à venir seront marquées par leur durcissement, tant pour des raisons économiques qu'environnementales. C'est d'ailleurs une tendance déjà amorcée par les politiques publiques, par exemple dans le cas des limitations de la vitesse routière qui, dans la figure 20 ci-dessous, illustre un premier degré dans le durcissement des contraintes institutionnelles qui pèsent sur la mobilité automobile. Laquelle est également confrontée à la hausse des prix des carburants, qui constitue sur l'axe des contraintes économiques une autre première forme de durcissement des contraintes. Le changement de degré dans les contraintes, économiques d'une part et institutionnelles d'autre part sera donc au cœur de notre démarche prospective. Cette dernière s'efforcera de montrer comment pourraient évoluer et se combiner les contraintes économiques et institutionnelles. Progressivement, nous montrerons comment des changements graduels peuvent transformer les continuités en ruptures, les changements de degré en changements de nature.

Figure 17 : Le cadre général de positionnement des scénarios



3.2.1.2 Contraintes sur la mobilité : ouvrir le champ des possibles

Face à l'inexorable montée des contraintes sur la mobilité, la réaction la plus courante consiste aujourd'hui à se tourner vers la technologie. De façon quasi unanime, les politiciens comme les automobilistes, les chefs d'entreprise comme les enfants des écoles, attendent des ingénieurs la recette miracle. Les premiers annoncent la « voiture propre et sûre », les seconds rêvent de mettre les camions sur les trains quand les troisièmes voudraient plutôt des autoroutes dédiées aux camions, ou des « TGV fret ». Quant aux enfants, invariablement, chaque génération dessine un avenir radieux où la mobilité libre culmine dans l'usage des « scooters volants ». Ce dernier exemple est intéressant car étant le plus naïf, il est le plus emblématique des obstacles mentaux auxquels se heurte la démarche prospective.

Pour nous en convaincre, faisons en effet l'hypothèse que dans les décennies à venir, les questions environnementales et économiques auraient disparu. L'énergie serait abondante et propre, le niveau de vie universellement élevé et généralisé l'usage des hélicoptères, avions et autres scooters volants. Il suffit d'envisager cette situation pour imaginer les contraintes massives que la puissance publique devrait faire peser sur l'usage de ces engins pour d'évidentes raisons de sécurité et de saturation de l'espace (en trois dimensions). La question, face à ce scénario naïf, n'est pas celle de la plausibilité technique des scooters volants, mais celle de la réglementation forcément drastique de leur usage. **Car contrairement aux idées reçues, l'abondance généralisée accentue les contraintes sur les choix des individus**. C'est la principale raison qui nous incite à mettre en avant la question des contraintes dans nos scénarios. Non pas seulement les contraintes environnementales mais, plus globalement, les contraintes issues de l'abondance des individus, de la croissance de leur pouvoir d'achat et de la rareté de l'espace, du temps et, bien sûr, des matières premières et sources d'énergie.

L'économiste Milton Friedman a l'habitude de résumer le principal enseignement de la science économique par une formule lapidaire « *No free lunch* » que nous pouvons traduire par « rien sans rien ». Pour le sujet qui nous occupe, cela signifie que même en l'absence de choc énergétique ou économique majeur, la progression tendancielle de la mobilité va devoir payer le prix de sa consommation croissante d'espace et de temps. Avant même de prendre en compte d'éventuelles contraintes environnementales, nous devons mettre en lumière ces forces souvent obscures qui dictent leurs lois à nos comportements. Et pour cela, nous ferons un « détour de production », un « investissement productif » dans ce que nous enseigne depuis des millénaires la Mythologie grecque.

3.2.1.3 *La mythologie : un puissant levier pour la prospective*

Se lancer dans un travail prospectif n'est pas une mince affaire. N'est-il pas présomptueux, voire téméraire, de se lancer dans une recherche des visages possibles du futur ? En nous projetant au devant de la flèche du temps, ne sommes nous pas, selon la tradition mythologique grecque victime de l'*hybris*[15], cette démesure grisante qui pousse les mortels à se mesurer à une tâche qui relève plutôt des dieux ? La réponse est certainement positive, mais nous assumons pleinement le risque. Simplement, pour nous protéger des excès auxquels pourrait nous conduire une démarche trop terre à terre, nous allons, avec certains héros de la mythologie grecque, nous mettre dans les pas des dieux. Comme le rappelle Jacques Lacarrière dans un ouvrage récent[16], la mythologie n'est-elle pas un « *miroir que tendait vers la terre le ciel pur de la Grèce, et où nous pouvons toujours nous reconnaître… Les Sirènes sont les figures de la tentation, la Chimère celle de la rêverie utopique, le dragon celle de l'emprise du passé, le Cyclope celle de la force physique et brutale. Oui, tous les habitants du pays des mythes, si singuliers ou monstrueux soient-ils, ont pouvoir, vocation à incarner une part de nous même* ».

Cette citation va nous servir de fil de trame tout au long de notre travail. Comme les lecteurs de la mythologie, nous allons nous exposer au poids du passé, à la tentation des Chimères et des Sirènes, à la force brutale des contraintes physiques, techniques (le rêve prométhéen !), sociales et économiques. Avec ces êtres fictifs et ces forces bien réelles, nous allons bâtir nos scénarios en gardant en tête ce que nous a appris Cicéron sur les différences et ressemblances entre les humains et les dieux[17]. Si, à la différence de ces derniers, nous sommes mortels, nous avons avec eux un point commun : comme eux, nous sommes doués de raison, nous pouvons chercher à comprendre la logique des forces qui nous meuvent pour essayer ensuite de jouer avec les contraintes.

Ainsi, la raison, autre héritage de la culture classique, va nous servir de fil de chaîne. Si la trame de nos scénarios empruntera à la mythologie et n'hésitera pas à susciter quelques figures emblématiques de chacune des grandes familles de scénarios, la chaîne sera tout sauf romanesque. Puisque nous sommes dans une logique de contraintes, nous raisonnerons dans un cadre analytique caractérisé par les contraintes et la façon dont leur accentuation pourrait nous pousser à remettre en cause certaines tendances lourdes observées au cours des

[15] Une jeune Athénienne nommée Mirmyx illustre un cas d'*hybris*. Elle se vantait en effet d'avoir inventé la charrue. Pour la punir de cette imposture, la déesse Athéna, authentique créatrice de l'instrument aratoire, transforma Mirmyx en fourmi !
[16] Jacques Lacarrière, Dictionnaire amoureux de la Mythologie, Plon, 2006, 555p.
[17] Voir sur ce point Paul Veyne, Le monde gréco-romain, Editions du Seuil, 2005, chapitre 3

décennies passées. Chaque famille de scénarios correspond ainsi au franchissement d'un degré supplémentaire dans la remise en cause de ce qui est souvent considéré comme l'ordre normal des choses en matière de mobilité.

3.2.2. Les arguments des scénarios de mobilité durable

3.2.2.1 Famille de scénarios n°1 : Pégase

Si nous nous référons à la figure n°1, cinq déterminants principaux jouent sur la mobilité des personnes et des marchandises : Le contexte démo-économique, les technologies, les modes de vie, l'organisation de la production et de la distribution, et enfin les politiques publiques. Ces cinq « blocs de facteurs » se combinent pour donner naissance à quelques faits stylisés de la mobilité que synthétisent des indicateurs clés comme les passagers-kilomètres, les tonnes-kilomètres etc.…lesquelles, pour une technologie donnée, nous informent sur les niveaux d'émission de gaz à effet de serre. Dans cette première famille de scénarios, nous allons considérer que parmi ces éléments, seuls deux sont des variables susceptibles d'inflexions majeures alors que les trois autres demeureront très largement des contraintes, des éléments structurels auxquels, dans un premier temps, nous ne toucherons pas. De façon synthétique nous obtenons ainsi trois catégories d'analyse regroupées comme ci-dessous.

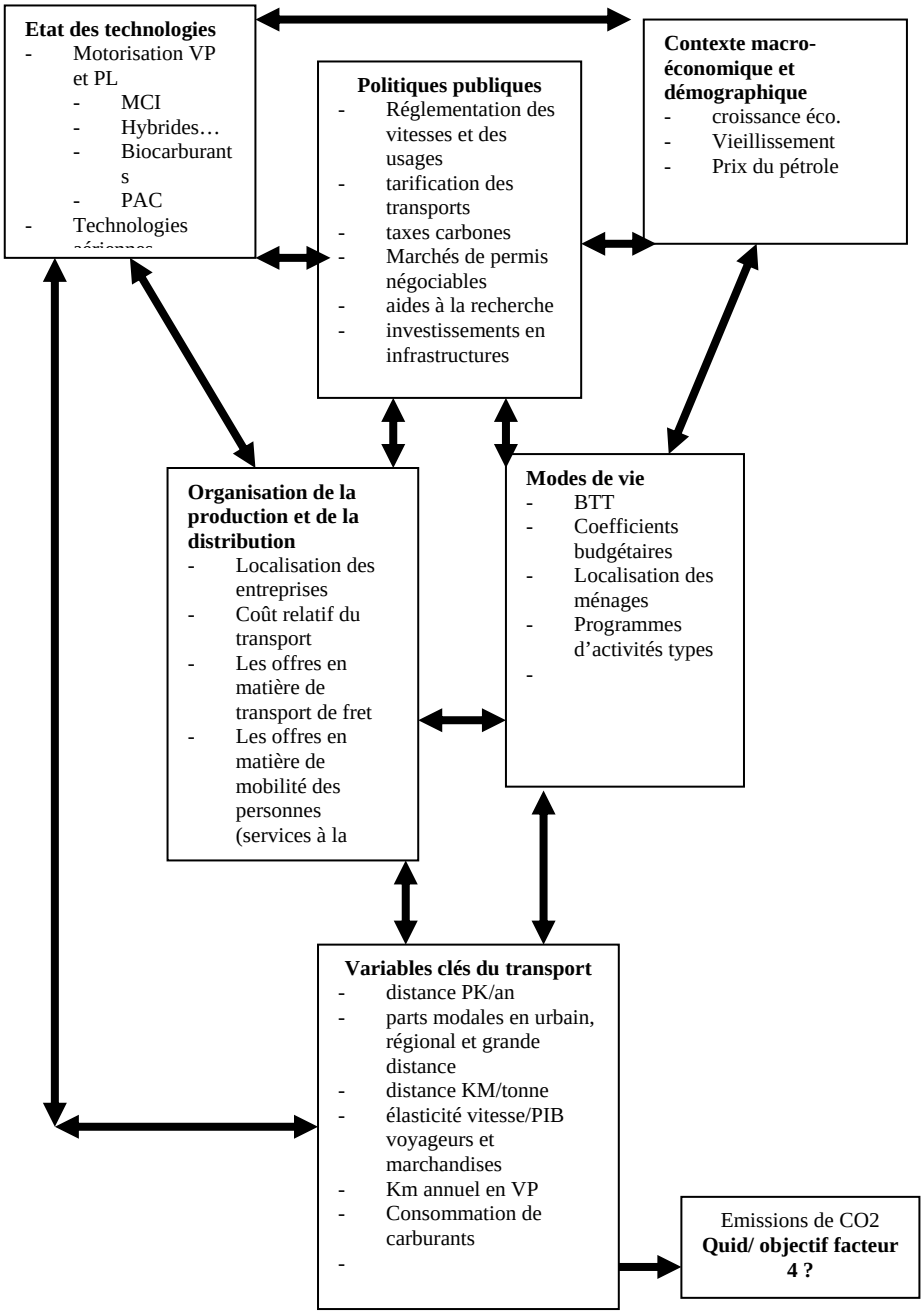
Tableau 5 : Variables et indicateurs de mobilité : scénarios Pégase

Contraintes et tendances structurelles →	**Variables** →	**Indicateurs de mobilité**
- **Tendances démo-économiques** Croissance économique poursuivie Vieillissement de la population Hausse des prix du pétrole - **Organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation Faible coût relatif du transport et massification des flux Offre fret sans grands changements Succès des hypermarchés - **Modes de vie** Budgets temps de transport constants Coefficients budgétaires stables pour les dépenses de mobilité Localisation des ménages et programmes d'activités inchangés	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les politiques publiques** Aides à la recherche Soutien à l'offre de véhicules performants Investissements en infrastructures	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

En figeant peu ou prou les éléments de contexte qui caractérisent la situation actuelle des économies industrialisées, c'est à dire en nous plaçant dans la vision tendancielle quantifiée plus haut, nous ne nous donnons comme leviers que les améliorations technologiques et les politiques publiques qui les accompagnent. Ces dernières jouent principalement sur la réglementation et, marginalement, sur la tarification, accompagnées des aides à la recherche et des investissements en infrastructures nécessaires pour rendre possible la poursuite de la

progression de la mobilité. Nous avons donné le nom de Pégase à cette famille de scénarios car elle s'inscrit dans une logique de renforcement de la toute puissance de l'homme en matière de mobilité. Le cheval ailé ne rappelle-t-il pas la chimère des «scooters volants » ? La mobilité en transport aérien connaît dans cet ensemble une progression continue, sauf si les politiques publiques contraignent cette activité et, notamment en France, poussent vigoureusement l'usage du TGV

Figure (rappel) : Les déterminants de la mobilité



3.2.2.2 Famille de scénarios n°2 : Chronos

Le principal résultat de la famille de scénarios Pégase, on le verra dans la partie 3, est qu'il ne sera pas évident d'atteindre le « facteur 4 » dans l'ensemble du secteur des transports, même en faisant des hypothèses optimistes sur l'évolution des technologies disponibles. Il se peut alors que les politiques publiques se montrent plus contraignantes, tant sur les aspects réglementaires que tarifaires[18] alors même que pourrait s'accélérer la hausse des prix des carburants. On verrait alors apparaître une pression forte sur les modes de vie et notamment les budgets temps de transport (BTT) avec les implications logiques qui en découlent pour les modes de vie. Ces derniers deviennent donc une variable dans la seconde famille de scénarios qui prend le nom de Chronos car la rareté relative du temps s'aiguise au fur et à mesure qu'augmente notre revenu. Cela se traduit par une tendance à substituer les modes de transport rapides aux modes lents. Un mouvement qui entre en contradiction frontale avec les exigences d'une division par 4 des émissions de CO_2. La question des vitesses relatives des différents modes et de leurs parts de marché devient donc cruciale dans cette famille de scénarios. Le transport aérien sera-t-il sanctuarisé ou au contraire sommé de limiter sa progression ? Les politiques publiques joueront ici un rôle important (taxes carbones, quotas d'émission pour le transport aérien…)

Tableau 6 : Contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénarios Chronos

Contraintes et tendances structurelles →	Variables →	Indicateurs de mobilité
- **Les tendances démo-économiques** Croissance économique Vieillissement Hausse des prix du pétrole - **L'organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation Hausse du coût relatif du transport qui accroît la massification des flux Offre fret sans grands changements Succès confirmé des hypermarchés	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les modes de vie** Hausse des BTT Coefficients budgétaires en hausse pour les dépenses de mobilité Localisation des ménages inchangée mais rationalisation des programmes d'activités. - **Les politiques publiques** Contraintes accrues sur la vitesse et les usages de la route Développement des péages Taxes carbones Aides à la recherche Investissements en infrastructures TGV	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

[18] Lors de la préparation du « Grenelle de l'environnement », il était symptomatique de noter que le gouvernement s'orientait vers un péage PL sur le réseau national alors que les transporteurs routiers (FNTR) se déclaraient prêts à accepter une baisse des vitesses maximales sur les autoroutes. Une illustration de l'accentuation des contraintes sur la mobilité des marchandises (et aussi des personnes) par le mode routier.

3.2.2.3 Famille de scénarios n°3 : Hestia

Les scénarios de la famille Chronos ont pour but de montrer que l'accentuation des contraintes sur la mobilité n'a pas seulement un impact financier pour les ménages et les firmes. En contraignant le transport routier, tant par la hausse des coûts que par la baisse des vitesses relatives, les politiques publiques incitent les individus à modifier leurs modes de vie. Car ces mesures poussent à la hausse du BTT et du budget monétaire, pour les voyageurs comme pour les marchandises. Dans un cas comme dans l'autre, des réorganisations sont nécessaires, notamment pour offrir des alternatives à la route faiblement émettrice nette de CO2. Mais tant l'ampleur nécessaire de ces réorganisations que les incertitudes sur leurs impacts réels quant aux comportements de mobilité des acteurs, ne permettent pas de garantir que l'objectif visé en matière d'émissions de GES sera atteint en temps et en heure. Il faut pour cela imposer une contrainte normative supplémentaire, comme par exemple des quotas d'émissions pour les passagers et les marchandises. Dans cette nouvelle famille de scénario, Hestia, les modes de vie, les localisations de l'habitat, mais aussi l'organisation de la production et de la redistribution des marchandises deviennent des variables d'ajustement. Hestia étant dans la mythologie grecque la déesse du foyer, elle représente un mouvement potentiel de la production comme de la consommation, y compris celle des services comme les loisirs, la culture ou le tourisme.

Tableau 7 : Contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénarios Hestia

Contraintes et tendances structurelles	→ Variables →	Indicateurs de mobilité
- **Les tendances démo-économiques** Croissance économique Vieillissement Hausse des prix du pétrole	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les modes de vie** Arrêt de la hausse des BTT Coefficients budgétaires stabilisés pour les dépenses de mobilité Localisation des ménages revues et adoption de programmes d'activités moins gourmands en mobilité. - **L'organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation remise en cause pour certains biens et services Hausse forte du coût relatif du transport Offre commerciale (biens et services) revue en faveur de la proximité. - **Les politiques publiques** Contraintes fortes sur la vitesse et les usages de la route Développement des péages Taxes carbones Marchés de permis négociables Aides à la recherche	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

Les politiques publiques accompagnent le mouvement en durcissant encore les mesures visant à réduire la mobilité. Ainsi, elles limitent les investissements dans les infrastructures de transport et soutiennent au contraire les activités qui valorisent la proximité. Le vieillissement de la population et la moindre fringale de mobilité qui en résulte facilite cette réorientation qui se fait en première analyse en conservant une croissance économique tendancielle.

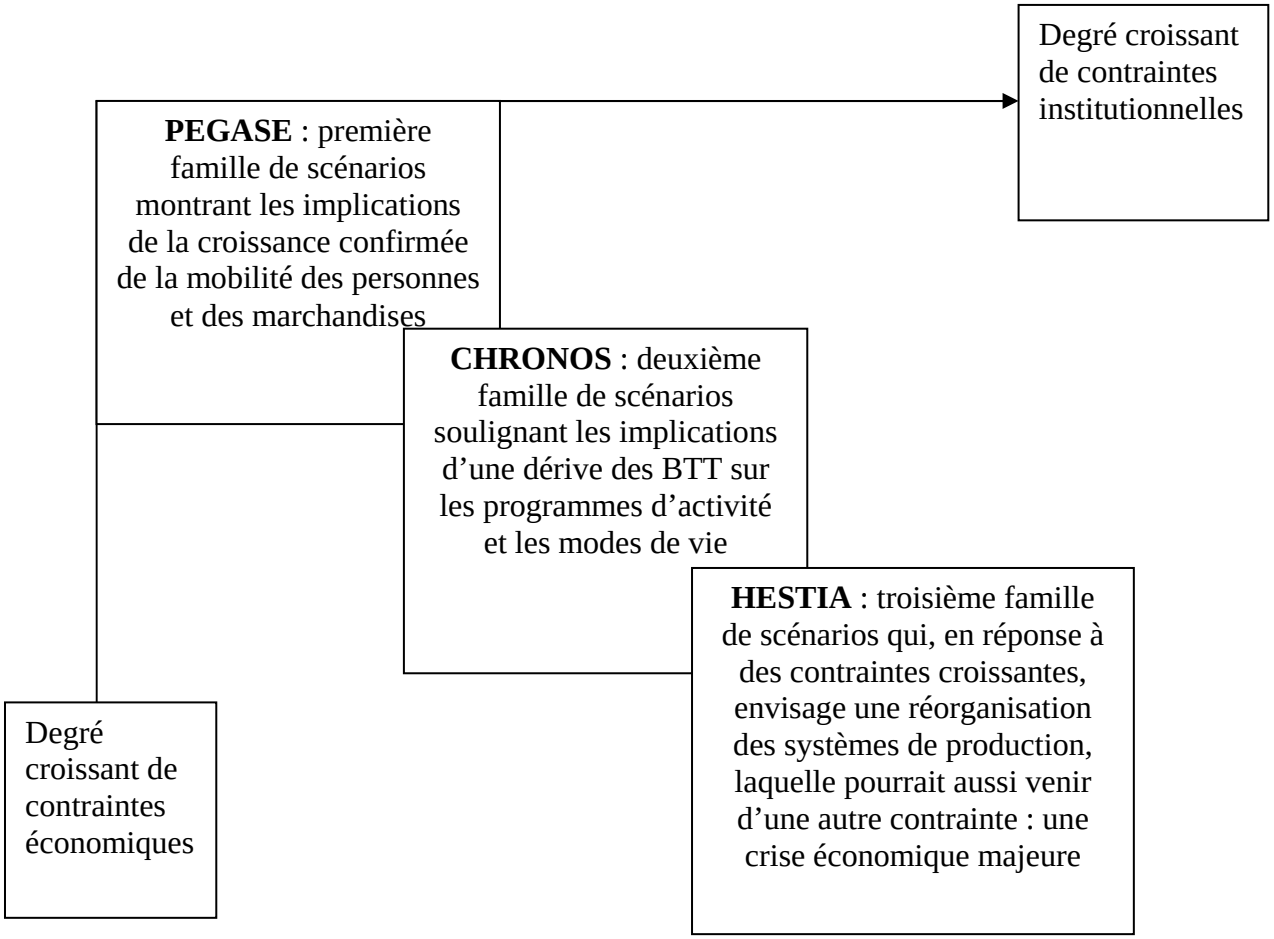
Mais il n'est pas impossible que ces évolutions soient également réalisées sous la contrainte de chocs extérieurs, économiques ou énergétiques, remettant en cause la croissance économique. La famille Hestia comporte donc (cf. tableau 14 b) une variante où le contexte démo-économique lui même est remis en cause, non pas comme variable nouvelle mais comme un changement radical du contenu de la contrainte.

Tableau n°14 b : Contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénario « Hestia 2 »

Crise = nouvelles contraintes et tendances structurelles →	**Variables** →	**Indicateurs de mobilité**
- **Les tendances démo-économiques** Crise économique Vieillissement Prix de l'énergie en baisse ou stabilisés, mais demande faible	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les modes de vie** Arrêt de la hausse des BTT Coefficients budgétaires en hausse pour les dépenses de mobilité du fait de la baisse des revenus. Localisation des ménages revue et adoption de programmes d'activités moins gourmands en mobilité. - **L'organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation remise en cause pour certains biens et services, notamment du fait de la crise. Réduction des économies d'échelle dans le transport car baisse du trafic Offre commerciale (biens et services) revue en faveur de la proximité. - **Les politiques publiques** Contraintes allégées sur la vitesse et les usages de la route Remise en cause des péages voire subventions de certaines mobilités Baisse des taxes carbones Suppression des quotas d'émissions Aides à la recherche	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

Il est important de noter que dans ce cas, les politiques publiques ne sont plus centrées sur une contrainte accrue, réglementaire et tarifaire sur la mobilité des personnes et des marchandises. C'est la raison pour laquelle nous n'avons intégré cette variante qu'en fin de parcours dans la mesure où, en termes d'émissions, elle ne pose plus de problème aux politiques publiques. La crise économique a réglé le problème en cassant les ressorts de la hausse de la mobilité. Nous considérons que cette hypothèse est d'une certaine façon trop simpliste, et comme on le comprend à la lecture de la figure 21, elle se situe à la l'extrême limite de notre cadre général d'analyse des scénarios. Dans ce cas en effet, il y a bien une contrainte forte sur la mobilité des personnes et des marchandises, mais elle ne provient pas des politiques publiques et des exigences liées au facteur 4, elle est le résultat non voulu d'une crise économique.

Figure 18 : La logique d'emboîtement des trois familles de scénarios.



Nous éviterons donc de donner trop d'importance à cette variante qui revient à considérer le malade comme guéri … une fois qu'il est mort. Nous consacrerons par contre plus de temps à la variante 1, qui constitue un véritable défi intellectuel : la croissance économique peut-elle se poursuivre avec une autre organisation du système de production et de distribution ? avec une mobilité stabilisée, voire réduite, des personnes et des marchandises ? Il s'agit d'un défi car comme nous allons le voir avec la famille Pégase, la hausse tendancielle de la mobilité est étroitement liée à la croissance économique.

3.2.3. La prise en compte des politiques publiques dans les scénarios

3.2.3.1 Le rôle des politiques publiques dans les scénarios

Les scénarios de mobilité durable explorent trois voies majeures pour diviser par quatre les émissions de GES tout en respectant les autres dimensions de la durabilité :

- sur le plan économique : absence de feedback négatif majeur, effet d'entraînement.
- sur le plan social : équité, temps perdu, sécurité.
- sur le plan environnemental : pollution locale, bruit.

Chacune de ces voies suppose la définition et la mise en œuvre de politiques publiques, partant du double constat :

- que les seules forces du marché ne suffiront pas à orienter spontanément le système de transport vers la soutenabilité et le Facteur 4.
- qu'au-delà de ces forces du marché, chaque voie suppose un ensemble spécifique de mesures de politique publique, différent d'une voie à l'autre.

Les politiques publiques susceptibles d'accompagner ces différentes voies vers la mobilité durable s'articulent autour de quelques grands instruments que l'on peut schématiser comme suit :

- règlementation
- régulation par les prix et taxes
- régulation par les quantités (quotas)
- incitations
- investissements publics (R&D, infrastructures).

A chaque voie vers la mobilité durable correspond une architecture spécifique de ces instruments.

Chaque instrument se décline en séries de mesures de politique publique qui se caractérisent par leur aspect plus ou moins contraignant, par leurs coûts de mise en œuvre, publics et privés, par leur efficacité.

Pégase

Pégase est le scénario qui décrit une voie vers le Facteur 4 et la mobilité durable axée avant tout sur la technologie.
Dans ce scénario, les politiques publiques sont définies et mises en œuvre en fonction d'un objectif majeur : créer les conditions pour qu'émergent et s'imposent les technologies les plus faiblement émettrices de GES du puits à la roue, en limitant autant que faire se peut les effets secondaires sur la mobilité et l'organisation des transports.

Les instruments privilégiés dans Pégase sont ceux susceptibles d'affecter le moins le coût de la mobilité, à fortiori là mobilité elle-même : Investissement R&D, règlementation des émissions, incitations vers les constructeurs et les usagers.

La logique économique prévalant dans le choix et le calibrage des mesures est celui d'une internalisation d'une valeur du carbone correspondant à la contrainte Facteur 4 dans la fixation des niveaux de contrainte règlementaire, et d'une neutralité au regard du coût global actualisé des solutions technologiques vertueuses.

Chronos

Chronos est le scénario qui décrit une voie vers le Facteur 4 et la mobilité durable qui s'appuie essentiellement sur la maitrise de la vitesse, au-delà de l'apport de la technologie.
Dans ce scénario, les politiques publiques sont définies et mises en œuvre en fonction d'un objectif majeur : maitriser la croissance des vitesses de déplacement des personnes et des marchandises en limitant autant que faire se peut les effets secondaires sur la mobilité et l'aménagement du territoire.

Les instruments privilégiés du Chronos sont limités à la règlementation des vitesses maximales sur les infrastructures routières, la régulation par les prix et taxes et l'accompagnement par l'investissement public, dans les infrastructures ferroviaires et fluviales.

La logique économique prévalant dans les choix et le calibrage des mesures est également celui d'une internalisation de la valeur du carbone dans la fiscalité, et d'une neutralité de la mesure au regard de la fonction de coût généralisé de transport, valeur du temps incluse.

Hestia

Hestia est le scénario qui décrit la voie vers le F4 et la mobilité durable basée sur le contrôle des quantités de GES émises, qui suppose à la fois la maîtrise de la demande de transport et l'apport technologique.
Dans ce scénario, les politiques publiques sont donc définies et mises en œuvre en fonction d'un objectif simple : s'assurer, par un système de quotas progressifs, que les émissions de GES dans les transports soient conformes à la trajectoire définie à l'avance.

Les instruments de politiques publics au cœur d'Hestia sont, d'abord, la régulation par les quantités, accompagnée d'investissement R&D et infrastructures ferroviaires, fluviales et portuaires pour remettre de la souplesse dans le système.

La logique économique prévalant dans le choix et le calibrage des mesures est l'internalisation de la valeur du carbone dans la fixation des quotas, et d'une neutralité de la mesure au regard de la fonction de coût de transport généralisé, valeur du temps incluse.

3.2.3.2 *Problématique générale de l'évaluation des politiques publiques dans les scénarios de rupture*

Nous sommes contraints de partir du constat suivant : le calcul économique classique ne nous est que de peu d'utilité pour aborder la question « quelle est la politique publique optimale pour attendre le Facteur 4 et la mobilité durable » ?

Le calcul économique se heurte en effet aux obstacles suivants :

- Depuis les travaux de L. Boltanski et L. Thévenot (1991), nous savons que toute justification s'inscrit dans une certaine vision du monde, généralement implicite. Ce constat s'applique au calcul économique qui, bien qu'il monétarise les coûts externes et les avantages non marchands comme les gains de temps, ou peut-être à cause de cela, est considéré comme une pratique technocratique : reflet d'un certain "monde" de pensée, ignorant d'autres dimensions, d'autres "mondes", réputés plus sensibles aux

exigences de l'aménagement du territoire ou de la protection de l'environnement, etc. Le calcul économique est donc aujourd'hui en partie déconsidéré[19]. Pour cette raison, suivant une demande du conseil général des Ponts et Chaussées, les Groupes opérationnels (GO) n° 1 et n°11 du PREDIT ont lancé un travail de recherche sur les pistes de travail qui pourraient non pas refonder, mais enrichir le calcul économique afin de le rendre plus adapté aux questions qui se posent aujourd'hui en matière de développement des infrastructures de transport (Maurice et Crozet 2007)[20].

- Les modèles économiques habituels, qui servent de fondement au calcul économique, sont construits généralement sur des corrélations statistiques historiques et sur des coefficients techniques déterminés par un état donné de la technologie. Ils ne peuvent dès lors permettre d'appréhender de façon pertinente et fiable les conséquences macro-économiques et sectorielles de scénarios non tendanciels au-delà d'une dizaine d'années, a-fortiori à un horizon aussi lointain que 2050.

Ce constat vaut autant pour l'évaluation des scénarios eux-mêmes que pour l'évaluation des instruments et mesures politiques qui y conduisent, par exemple la fiscalité des carburants ou les permis d'émission.
Pour autant, l'évaluation économique et sociale des impacts de ces mesures, de même que l'évaluation des conditions économiques et sociales qui prévaudront en 2050 dans ces scénarios, restent une nécessité au regard de la décision.

La réponse à ce défi, formalisée au cours du PREDIT2, a consisté à proposer une analyse qualitative descriptive des impacts des mesures, à deux niveaux[21] .

- A un niveau micro-économique, elle consiste à « mesurer » comment les volumes d'activité des agents économiques d'un côté, les catégories de prix et coûts du transport de l'autre, sont affectés par la mise en œuvre des mesures : impacts directs et ciblés, positifs et négatifs, impacts indirects et non ciblés.

- Au niveau sectoriel, elle a consiste à « mesurer » avec quelle efficacité les objectifs technologiques et organisationnels sous-jacents à la soutenabilité des transports, sont atteints par la mise en œuvre des mesures, directement et indirectement, et dans quelle mesure il faut s'attendre à des effets contraires.

Cette analyse descriptive permet de mieux comprendre et de mieux cerner les inflexions à attendre dans l'évolution des structures économiques, et d'identifier les forces et les intérêts qui sont susceptibles de « pousser » vers la soutenabilité et ceux qui vraisemblablement s'y opposeront.
Elle ne peut avoir toutefois de vocation décisionnelle, c'est à dire conduire à privilégier tel paquet de mesures par rapport à tel autre du fait de leurs impacts économiques, qu'à partir du moment on l'on s'est doté d'un système consensuel de pondération de ces impacts.

En effet, des mesures peuvent être plus ou moins difficiles à mettre en œuvre, car plus ou moins acceptables par les acteurs économiques, et leurs impacts peuvent entraîner des

[19] Pour une analyse détaillée, voir Crozet 2004
[20] Une version synthétique de la recherche est téléchargeable sur le site du LET www.let.fr
[21] ENERDATA - Transport, énergie et contraintes environnementales en France à l'horizon 2030: apports de l'approche « back casting » à la formulation des stratégies technologiques et organisationnelles. 2ème phase : Mise en œuvre et impacts socio-économiques des scénarios de développement durable du système des transports en France – Rapport à l'ADEME et au PREDIT – Grenoble, 2000

changements dans les structures économiques plus ou moins prononcés et contribuer plus ou moins fortement à atteindre les objectifs de viabilité écologique visés.

Pour relativiser ces impacts économiques les uns par rapport aux autres, il faut donc établir un système de pondération des impacts:

- ❖ selon la nature et l'intensité de mise en œuvre des mesures d'une part,
- ❖ selon les catégories micro-économiques affectées par ces mesures d'autre part: volume et conditions de production des acteurs économiques et niveaux de prix et coûts ;
- ❖ selon les objectifs sectoriels visés dans le cadre du TEV enfin: changements technologiques et changement dans la demande de transport.

Sur le détail de la méthode proposée, on renvoie le lecteur au rapport de l'étude donnée en référence.

3.2.3.3 *Caractériser les politiques publiques*

Il ne suffit pas de caractériser les politiques publiques par la mise en œuvre de telle ou telle mesure ou paquet de mesures, encore faut-il préciser

- le caractère plus ou moins contraignant de la mesure, certes essentiellement défini par le type d'instrument auquel se raccorde la mesure, mais également étroitement lié aux mesures dites d'accompagnement
- le degré d'exhaustivité de la mesure, défini à partir de notion de champ et de couverture spatiale
- l'intensité avec laquelle la mesure est mise en œuvre.

Les deux premiers critères permettent d'établir un système de pondération relative des mesures, qui, croisé avec l'intensité de mise en œuvre, permet de dresser une hiérarchie des mesures (ou plutôt des paquets de mesures) au regard de la probabilité d'atteindre les objectifs de mobilité durable.
Pour connaître le détail du système de pondération employé, on renvoie le lecteur au rapport cité plus haut (PREDIT 2, 2000)

3.2.3.4 *L'impact des mesures sur l'activité économique : qui perd, qui gagne ?*

Le degré d'adhésion ou d'hostilité des acteurs économiques à la mise en place des mesures dépend principalement de deux facteurs :

- leur sensibilité à la nature même des mesures, c'est à dire leur plus ou moins grande réaction - positive ou négative - à la mise en œuvre de ces mesures, fondée sur l'impact attendu de ces mesures sur le chiffre d'affaire
- l'intensité avec laquelle ces mesures sont mises en œuvre

Par ailleurs, le degré d'adhésion ou d'hostilité des acteurs ne pèse dans la décision concernant la mesure que pour autant qu'eux-mêmes « pèsent » dans l'ensemble de l'économie.

Le système de pondération des acteurs repose d'abord sur l'établissement d'une typologie préalable des acteurs pertinente au regard des impacts attendus des mesures considérées sur leur volume d'activité. Il consiste ensuite à croiser les trois critères « sensibilité », « taille » et « intensité de la mesure » pour associer un « poids relatif » de chaque acteur pour chaque mesure.

Tableau 8 : Système de pondération des acteurs

Poids relatif	peu réactif	réactif	trés réactif
peu génant/entrainant	1	2	3
génant/entrainant	2	3	4
très génant/entrainant	3	4	5

Ce système permet de construire une hiérarchie des acteurs de celui qui « gagne » le plus à celui qui « perd » le plus pour chaque mesure (paquet de mesures) spécifiée comme indiqué plus haut.

Pour connaître la liste des acteurs considérés et le détail du système de pondération employé, on renvoie le lecteur au rapport cité plus haut (PREDIT 2, 2000)

3.2.3.5 L'impact des mesures sur les prix et les coûts du transport

Les mesures de politique publique supposées mobilisées dans les différents scénarios ont quasiment toutes des répercussions sur les coûts de transport : soit parce qu'elles affectent les coûts d'acquisition des véhicules ou des modes de transport, soit parce qu'elles modifient les coûts d'usage des véhicules et des modes au km parcouru (énergie, coût d'usage des infrastructures), soit encore parce qu'elles conduisent à des substitutions entre des modes ayant des coûts différents au km parcouru.

Selon les mesures, et leur intensité de mise en œuvre, les impacts sur les différentes composantes du coût de transport sont plus ou moins prononcés, en positif ou en négatif.

Le système de pondération des catégories de prix et coûts repose d'abord sur l'établissement d'une typologie préalable de ces catégories pertinente au regard des impacts attendus des mesures considérées sur ces catégories. Il consiste ensuite à croiser les trois critères « sensibilité », « poids dans la formation du coût moyen de transport » et « intensité de la mesure » pour associer un « poids relatif » de chaque catégorie de prix/coût pour chaque mesure.

Tableau 9 : Système de pondération des catégories de prix et coûts

Poids relatif	Poids dans le formation du coût moyen de transport		
	faible	sensible	fort
peu réactif	1	2	3
réactif	2	3	4
très réactif	3	4	5

Ce système permet de construire une hiérarchie des catégories de prix et coûts, de celle qui impacte le plus à la baisse le coût moyen de transport à elle qui l'impacte le plus à la hausse, pour chaque mesure (paquet de mesures) spécifiée comme indiqué plus haut.

Pour connaître la liste des catégories considérées et le détail du système de pondération employé, on renvoie le lecteur au rapport cité plus haut (PREDIT 2, 2000).

3.2.3.6 L'impact des mesures sur l'atteinte des objectifs de durabilité

Cette recherche est clairement axée sur un objectif quantitatif particulier de durabilité, la réduction par quatre des émissions de GES des transports. C'est par rapport à cet objectif majeur que l'on s'intéresse à l'impact des mesures sur l'atteinte des objectifs.

Les mesures mises en œuvre dans les politiques publiques afférentes aux différents scénarios n'imposent pas le même degré de contrainte quant à la réduction effective des émissions de GES, et n'ont pas la même efficience au regard de cet objectif : imposer une norme sur les émissions spécifiques des véhicules routiers ou imposer un quota sur les émissions de GES a bien évidemment plus de chances de conduire à une réduction effective des émissions qu'une simple campagne de sensibilisation ou même l'introduction d'une taxe carbone.

Le système de pondération retenu repose d'abord sur l'établissement d'une typologie préalable des objectifs catégoriels sous-jacents à l'objectif global F4, pertinente au regard des impacts attendus des mesures au regard de ces objectifs catégoriels. Il consiste ensuite à croiser les deux critères « efficience » (3 niveaux) et « intensité de la mesure » pour associer un « poids relatif » de chaque objectif sectoriel pour chaque mesure.

Tableau 10 : Objectifs catégoriels du facteur 4

Promotion de l'utilisation des ENR
Promotion de l'utilisation de l'électricité
Promotion de l'utilisation du GPL, GNV
Amélioration du MCI, voiture et VUL
Amélioration du MCI, camons et bus
Promotion des hybrides, voitures et VUL
Promotion des hybrides, camions et bus
Promotion des PAC, voitures et VUL
Promotion des PAC, camions et bus
Baisse de la demande de transp. urbains motor.
Baisse de la demande de transp. Interurbains
Report de la voiture vers les TC
Report de la voiture vers le train en longue distance
Autres reports de la voiture vers les TC non urbains
Baisse de la demande de transp. fret longue dist.
Report de la route vers le rail du fret longue distance

3.2.3.7 Synthèse

La qualification des impacts et le système de pondération décrit succinctement ci-dessus permet d'associer in-fine, à tout programme d'actions publiques, une « cotation » selon les 3 axes : acteurs, coût moyen du transport, atteinte des objectifs catégoriels. Cette cotation n'a de signification qu'en termes relatifs, entre programmes d'actions: elle renseigne simplement sur le durcissement des conditions d'acceptabilité et sur l'approfondissement des transformations structurelles qu'entraîne tel programme d'actions par rapport à tel autre.

4 Partie 3: Scénarios de mobilité durable et politiques publiques

4.1 Pégase : toujours plus de mobilité ?

Pégase : lorsque l'abondance provoque une rareté relative croissante

Cheval ailé utilisé par Persée, puis Bellérophon, Pégase est bien plus qu'une simple monture. Comme les moyens de transport moderne, il est capable d'assurer à son maître des déplacements rapides qui lui font tutoyer le mythe de l'ubiquité. Mais il ne donne pas seulement la maîtrise de l'espace et du temps à son propriétaire, il lui donne aussi un pouvoir sur le monde, celui que ressent aujourd'hui l'utilisateur fréquent de l'avion. Mais la grande différence entre Persée juché sur Pégase et l'utilisateur actuel de l'avion, c'est le processus de démocratisation de l'accès aux modes rapides. Or, lorsque croît le nombre d'utilisateurs des moyens de transport rapides, maritimes, terrestres ou aériens, des phénomènes de rareté relative émergent de l'abondance même. La question que pose cette famille de scénarios est donc simple : comment gérer la croissance de la mobilité quand progresse l'accès à la vitesse et, plus encore à la grande vitesse ? Faut-il laisser faire et simplement accompagner le mouvement par le développement tous azimuts des infrastructures de transport ? Ou faut-il opérer un tri et n'encourager que les modes les moins gourmands en énergie fossile ?

4.1.1. Les fils directeurs de la famille de scénarios Pégase

4.1.1.1 Rappel sur les contraintes, variables et indicateurs de mobilité des scénarios Pégase

Reprenons le tableau ci-dessous qui rappelle ce que sont les contraintes et les variables clés de la famille de scénarios Pégase. Nous pouvons distinguer :

- Les tendances lourdes, principalement issues des forces du passé et de la connaissance que nous en avons. Elles sont, dans la famille Pégase, à vocation tendancielle, relativement nombreuses : croissance économique du fait de l'évolution des qualifications, lent vieillissement démographique, réduction de la taille des ménages, augmentation des prix et de la rareté du pétrole, constance maintenue des BTT mais persistance d'une croissance des distances parcourues, ce qui revient à dire qu'il existe une élasticité « vitesse/PIB » qui demeure positive.
- Les variables pour lesquelles subsistent des incertitudes. Elles sont relativement peu nombreuses dans la famille Pégase et se manifesteront par les évolutions différentielles des passagers kilomètres et donc des parts modales des différents modes. Quelle sera *in fine* la part de l'automobile dans les déplacements urbains ? Même question pour les déplacements interurbains avec ici deux ensembles de variantes majeures possibles.
  - la première, « Pégase 1 », qui voit l'avion se développer durablement au rythme de croissance qu'il connaît aujourd'hui.
  - la seconde, « Pégase 2 » dans laquelle le TGV et le fret ferroviaire (relativement) rapide joue un rôle plus important, notamment du fait de contraintes plus fortes sur le transport aérien. Ces contraintes venant notamment des politiques publiques.
- Les politiques publiques disposent de plusieurs leviers d'action. Outre les mesures tarifaires et fiscales d'une part, réglementaires et institutionnelles d'autre part, elles peuvent aussi recourir à des investissements plus ou moins importants dans les infrastructures ainsi qu'à un soutien plus ou moins fort au progrès technique.
- Bien évidemment, le choix de telle ou telle politique dépend largement des objectifs que l'on se fixe. Concrètement, cela signifie que derrière la formule générale du

facteur 4, se cachent des conceptions de l'avenir sans doute assez différentes les unes des autres. Il est ainsi clair que dans l'esprit de nombreux gouvernements aujourd'hui, l'objectif de facteur 4 renvoie essentiellement à une confiance dans les capacités du progrès technique. C'est pourquoi chacun des deux ensembles de variantes souligne la diversité des résultats en fonction des hypothèses technologiques.

Contraintes et tendances structurelles →	**Variables** →	**Indicateurs de mobilité**
- **Tendances démo-économiques** Croissance économique poursuivie Vieillissement de la population Hausse des prix du pétrole - **Organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation Faible coût relatif du transport et massification des flux Offre fret sans grands changements Succès des hypermarchés - **Modes de vie** Budgets temps de transport constants Coefficients budgétaires stables pour les dépenses de mobilité Localisation des ménages et programmes d'activités inchangés	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les politiques publiques** Réglementation des vitesses et des usages Tarification des transports Aides à la recherche Investissements en infrastructures	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

4.1.1.2 Du scénario du CGPC au scénario Pégase : mise en lumière des grandes tendances pour les marchandises

Le scénario Pégase est un scénario tendanciel où nous ne mettons pas en cause l'évolution du transport de marchandises où des vitesses liées à la structure des transports –que nous considérons qu'elles évoluent sans aucun obstacle et où la structure du scénario suppose des gains en matière de productivité et de revenu tendanciels, qui auront comme effet de continuer à faire croître le PIB et de continuer à créer de la valeur ajoutée.

Ainsi, dans ce scénario nous imaginons un développement sans inflexions importantes et qui répond à une évolution dans une économie où le prix des marchandises transportées continuera à augmenter alors que le prix relatif du transport continuera à baisser.

Pégase décris une évolution très semblable de ce nous avons pu voir au cours des derniers 20 ans en France où nous avons observé une augmentation des Tkm (en partie dû à la croissance des tonnages, mais surtout dû à la croissance des distances parcourues) des marchandises manufacturées, alors que le kilométrage moyen parcouru par les produits pondéreux sur le territoire s'est réduit.

Aux effets de ce scénario nous avons donc fait évoluer le modèle exposé dans la première partie en prenant en compte les tendances et contredanses apparues ces derniers décennies, au sein des pays industrialisés.

De manière générale nous pouvons dire que la tendance globale est à la 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 à ce qui devrait se manifester par une baisse ou une réduction des transports de marchandises.

Schliecher-Tappeser et al. (1998) définissent la dématérialisation comme la réduction du matériel requis par unité de PIB. Ceci peut être le résultat d'une réduction du poids des biens dans une économie donnée ; de la réduction de leur valeur relative ou ces deux éléments en même temps.

EUROSTAT a calculé plusieurs mesures du poids des biens dans les économies de l'UE. La plus approprié étant la consommation domestique matérielle (CDM) (McKinnon, 2006)

Le poids de la consommation domestique de matériel est calculé comme suit :

$$\mathbf{CDM} = \mathbf{DE} + \mathbf{IM} - \mathbf{EM}$$

Où DE est le poids total de tous les matériaux produits dans le pays pour une utilisation domestique ; IM est le poids total de biens importés et EM est le poids total des matériaux exportés.

Comme le CDM est le poids des matériaux consommés dans un pays, il est intimement lié au tonnage-kilométrique. Une diminution du CDM dans une économie qui connaît une croissance, pourrait se traduire en découplage.

Sur cette logique, McKinnon, dans son rapport « The Decoupling of Road Freight Transport and Economic Growth Trends in the UK: An Exploratory Analysis » remarque que plusieurs processus ont contribué à un découplage en Angleterre. Ces facteurs de découplage en Angleterre pourraient aussi être observés en France avec le même résultat.

La miniaturisation de la production ou l'utilisation des matériaux moins lourds. Le passage tendanciel vers une génération de biens de plus en plus électriques et/ou numériques où un certain nombre de produits pourraient demander de moins en moins de transport (les films par internet, musique en numérique, logiciels, articles de revues, journaux, livres).

En même temps, la baisse de la consommation en transport liée aux économies d'énergie pourrait se traduire par une baisse dans les importations de carburants. Ce qui pourrait aussi contribuer au découplage à travers une diminution de la CDM.

En revanche d'autres changements comme par exemple la réduction du cycle de vie des produits ou la croissance en taille de paquets et la diminution de la taille moyenne des logements ont eu des effets inverses (Schliecher-Tappeser et al. 1998).

Mais on ne doit pas oublier l'importance des contre-tendances.

- La première est le fait que les services purs sont rares, 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.…

- La seconde est liée à la première sous la forme de réduction de la taille des lots et de l'accroissement du ratio valeur ajoutée/ poids. Le fait que les produits ont 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.

- La troisième est liée aux conditions permissives ci-dessus, qui sont essentielles dans le mouvement général de division internationale du travail et de mondialisation. L'allégement relatif et la standardisation des marchandises, la réduction des coûts unitaires que permet, entre autres, le transport maritime, pousse à une extension des aires de marché et donc à une dispersion dans l'espace des zones de production et de consommation. Ainsi, les marchandises que nous consommons ont souvent fait des milliers de kilomètres avant de nous parvenir, ce qui heurte le sens commun mais est l'exacte contrepartie de la baisse des prix relatifs des produits manufacturés.

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 de marchandises : les tonnages transportés n'augmentent pas beaucoup, mais les TK 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, aérien par rapport aux autres), mais aussi la massification et la standardisation (cf. le transport maritime) qui ne changent pas nettement les vitesses relatives, mais assurent fiabilité et baisse des coûts relatifs.

Le scénario Pégase ne fait que prolonger tendances et contre-tendances, ce qui nous conduit à faire encore progresser le maritime et aussi le routier, même si le ferroviaire et la voie d'eau peuvent tirer leur épingle du jeu sur certains axes ; notamment en prolongement des trafics maritimes de conteneurs.

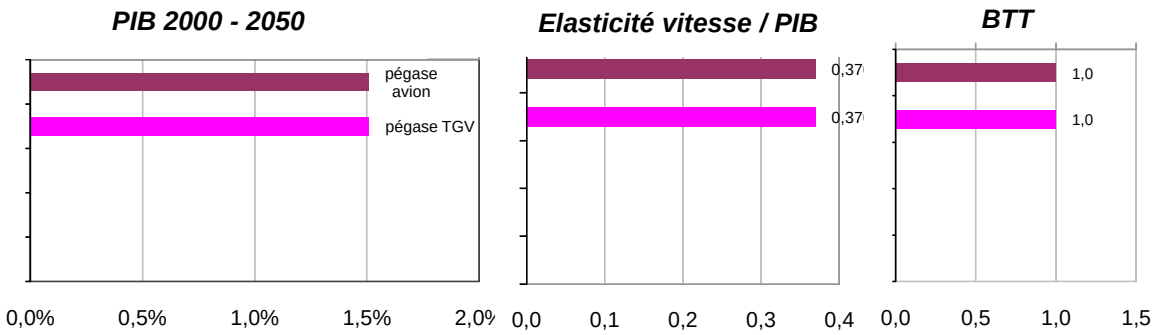
4.1.2. Les trafics voyageurs et les émissions de CO2 dans Pégase

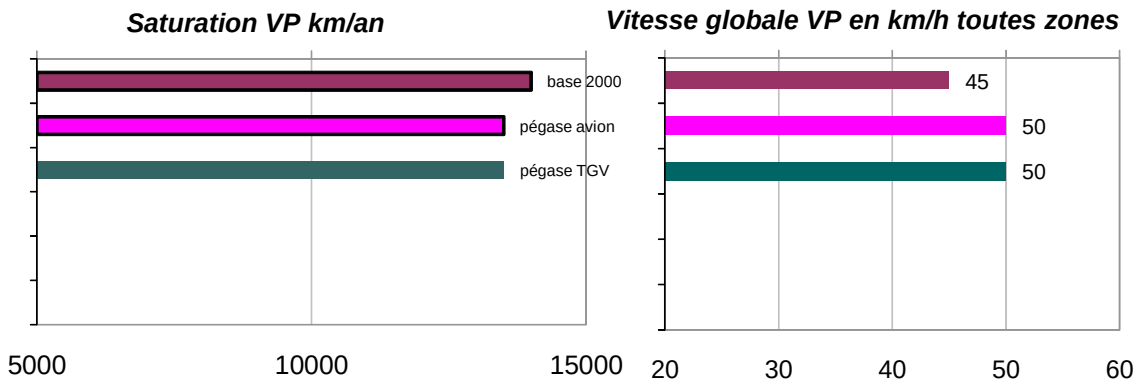
4.1.2.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Pégase

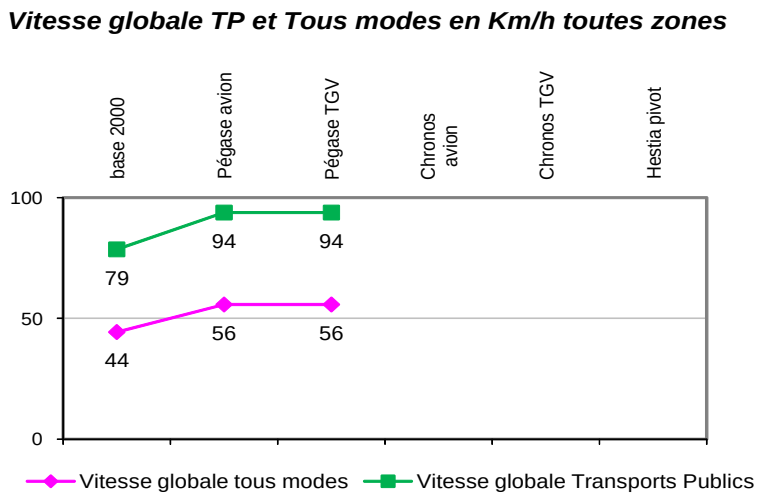
Les éléments de demande proviennent du CGPC-S1, de même que les éléments de contexte (PIB, pop). L'élasticité vitesse/PIB de 0,37 est déduite du scénario de référence CGPC.
Le budget temps moyen de déplacement est supposé stable, une heure par jour par personne en moyenne, et le kilométrage annuel moyen parcouru par les véhicules est supposé par hypothèse évoluer peu, 13 500km en 2050 contre 14 000 km en 2000.

Compte-tenu de ces hypothèses, TILT calcule une progression nécessaire de la vitesse moyenne de déplacement des personnes de 44 km/h en 2000[22] à 56 km/h en 2050.

Par hypothèse, et pour rester en conformité avec l'esprit du scénario, la vitesse moyenne des VP sur l'ensemble des zones est considérée en progression de 5km/h et passe de 45km/h en 2000 à 50 km/h en 2050.
En conséquence, compte-tenu de la circulation et de la vitesse moyennes des VP, TILT calcule que la vitesse moyenne des transports collectifs doit passer de 79km/h en 2000 à 94 km/h en 2050 pour assurer l'accroissement de la vitesse moyenne des déplacements.







[22] La vitesse moyenne 2000 résulte du rapport entre le trafic global observé et le volume d'heures de déplacement pour une budget temps moyen d'une heure par jour et par personne ; elle correspond à des vitesses conventionnelles par mode cohérentes avec la vitesse moyenne globale et les parts modales.

Une fois les trafics et les vitesses moyennes globales par mode obtenues comme indiqué ci-dessus (modes doux, VP et transports collectifs), TILT est ensuite utilisé pour mettre en cohérence d'un côté les hypothèses retenues sur les mobilités par service urbain et régional et de l'autre, la part de la VP dans ces services et les vitesses par mode et par service.

Les hypothèses retenues sur la progression de la mobilité individuelle par service urbain et régional sont celles indiquées pour le scénario tendanciel CGPC (partie 2).

Il existe toute une variété de combinaisons « part de la VP par service, vitesses des modes par service » qui assurent la cohérence d'ensemble sur les trafics et les vitesses compte-tenu des hypothèses de progression de la mobilité par service. Par construction du scénario Pégase, la combinaison que nous avons privilégiée est celle la plus proche de la prolongation des tendances. Elle se décline comme suit.

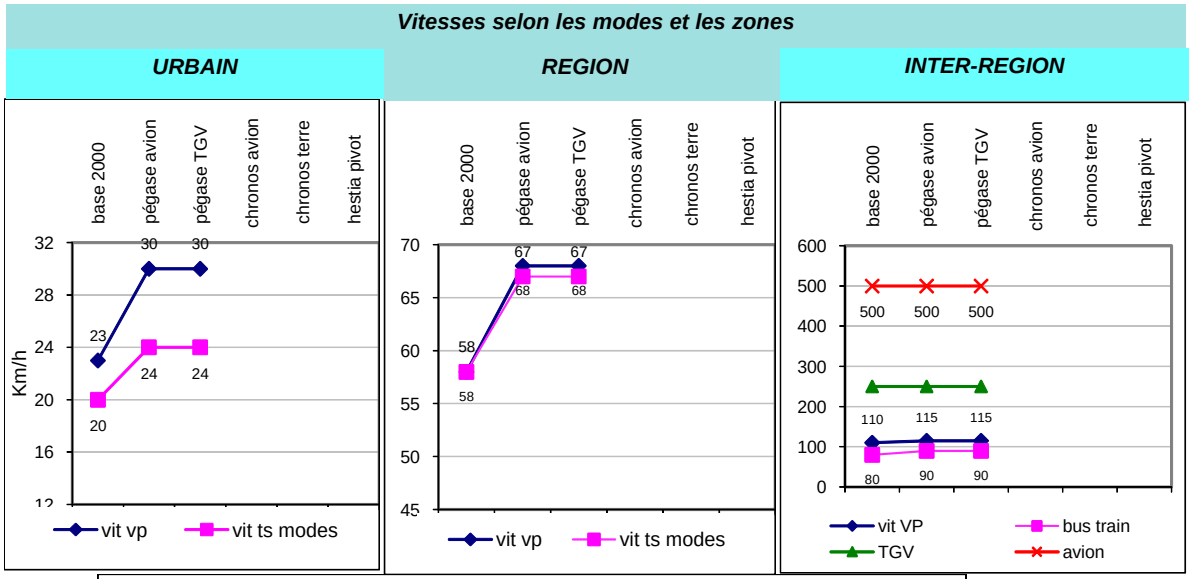
- en urbain, la part de la voiture dans la mobilité décroit de 90% (2000) à 72% (2050), tandis que sa vitesse progresse de 30 %, soit 7km/h, passant de 23 à 30 km/h entre 2000 et 2050, celle de l'ensemble des modes (modes collectifs, compris modes individuels et modes doux) progressant en moyenne de 20%, soit 4 km/h, passant de 20 km/h en 2000 à 24 km/h en 2050.

- en région, la part de la voiture dans la mobilité croit de 83% (2000) à 85% (2050), et sa vitesse augmente de 17%, soit 10km/h, en passant de 58km/h en 2000 à 68 km/h en 2050 , celle de l'ensemble des modes augmentant elle aussi de 16% , passant de 58 km/h en 2000 à 67 km/h en 2050.

En longue distance, on suppose que les vitesses par mode restent stables par rapport à l'année de base pour les modes rapides : 500 km/h pour l'avion, 250 km/h pour le TGV. La vitesse moyenne est supposée croître à 90 km/h pour les bus et trains conventionnels. En conséquence, pour assurer l'équilibre des trafics et des vitesses par mode en 2050, à la fois globalement et pour les services urbains et régional, TILT indique que la vitesse des voitures sur longue distance doit nécessairement progresser de 5%, et passer de 110 km/h (2000) à 115km/h (2050).

Les graphiques ci-dessous récapitulent l'évolution des vitesses par mode et par service de mobilité entre 2000 et 2050, vitesses identiques dans les deux variantes Pégase.

Figure 19 : Les vitesses modales du transport de passagers dans Pégase

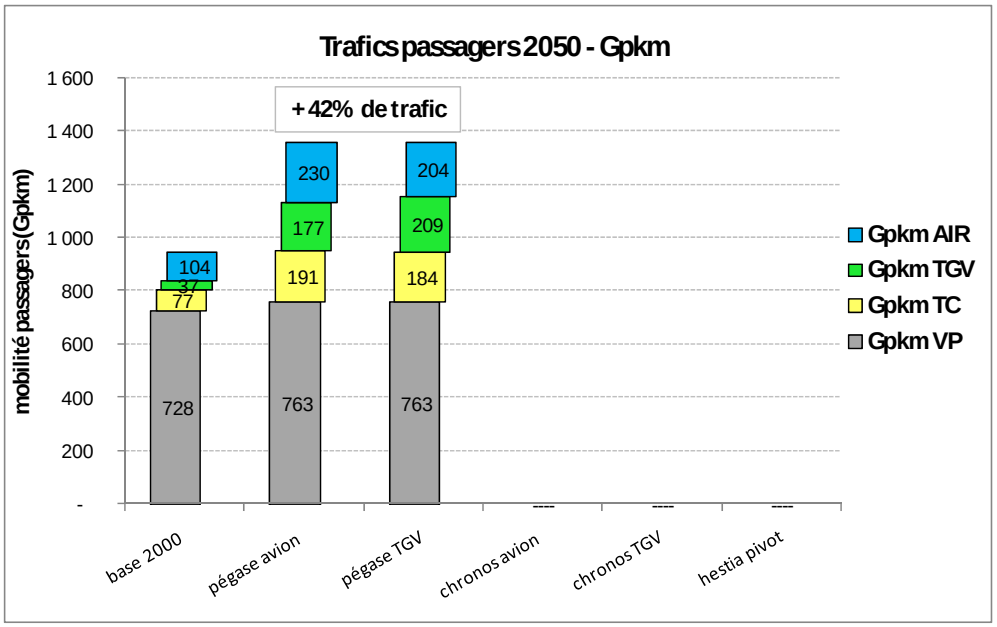


4.1.2.2 Les projections de trafics dans les scénarios Pégase

Vision d'ensemble

Le scénario tendanciel Pégase, se traduit dans ses deux variantes, par une hausse de trafic de (42%) par rapport à l'année de base 2000. Rappelons que sur la même période, la population française augmentera de 13 à 16%.

Figure 20 : Les trafics de passagers dans Pégase



Le trafic routier (en Gp km) progresse peu dans les deux variantes (7%), malgré une croissance de la circulation des VP relativement forte (44%). Ceci est du principalement à une baisse du taux moyen de remplissage des VP consécutif à deux phénomènes :

- d'une part à forte progression du poids relatif des ménages d'une et deux personnes dans la structure des ménages
- d'autre part à la progression du poids des services urbain et régional dans l'utilisation de la voiture.

En conséquence, la hausse globale du trafic repose essentiellement sur les modes collectifs lents et rapides :

- le trafic TC global est ainsi multiplié par 2,4 par rapport à l'année de base dans les deux variantes de Pégase, avion et TGV ;

- le trafic aérien est multiplié par 2,2 par rapport à l'année de base dans la variante Pégase avion et par 2 dans la variante Pégase TGV.

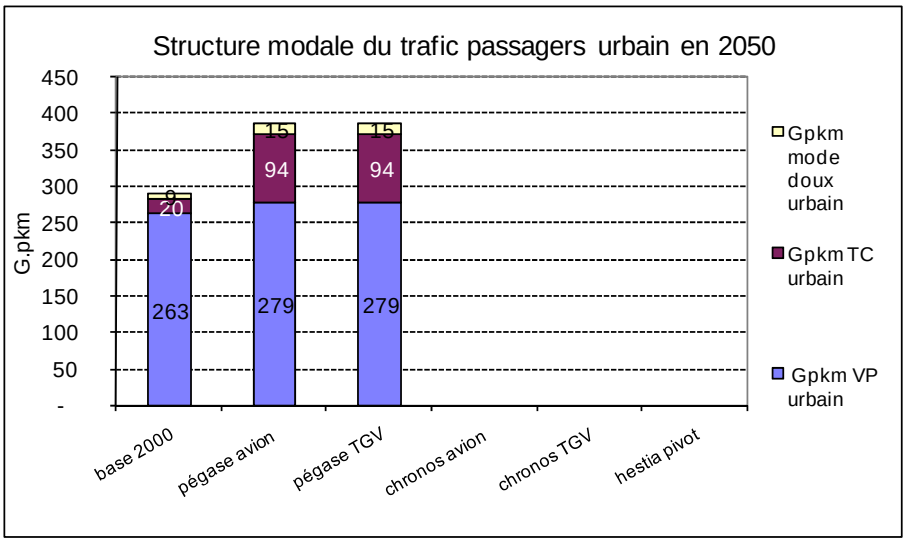
- le trafic ferroviaire TGV est multiplié par 3,8 par rapport à l'année de base dans la variante Pégase avion et 4,1 dans la variante Pégase TGV.

Les graphiques ci-après donnent des éléments de détails sur l'évolution des différentes parts modales selon les zones. On peut noter que les différences entre les variantes Pégase avion et Pégase TGV apparaissent seulement sur les déplacements en longue distance supérieur à 150 km.

Services de mobilité urbaine

Dans les zones urbaines (0 à 50 km), où le trafic augmente de 37% (à budget temps de transport constant), les trafics des transports collectifs sont en très forte croissance (multiplication par 4) de même que ceux des modes doux qui connaissent une progression d'un facteur 2. Le trafic voiture continue à progresser de 6% par rapport à l'année de base, notamment grâce à la hausse des vitesses. Bien qu'en baisse par rapport à l'année de base de 90% à 72%, la part modale de la voiture en urbain reste encore largement majoritaire en 2050. Les TC progressent quant à eux de 7% à 24%.

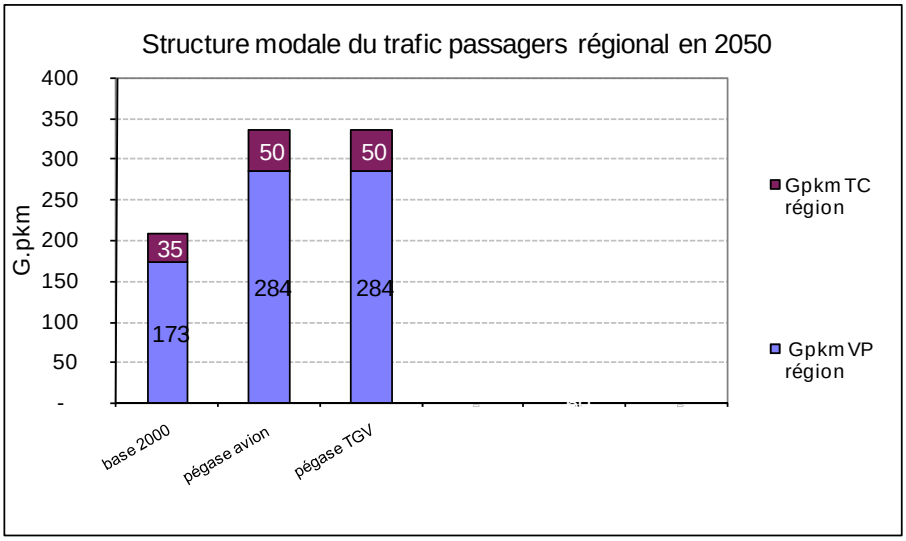
Figure 21 : Les structures modales du transport urbain de passagers dans Pégase



Services de mobilité régionale

Dans les zones régionales (50 à 150 km), la voiture progresse fortement (+65% par rapport à l'année de base). Cette progression lui permet de maintenir et d'augmenter légèrement sa part modale par rapport à l'année de base qui passe de 83% à 85%.

Figure 22 : Les structures modales du transport régional de passagers dans Pégase



Services de mobilité longue distance

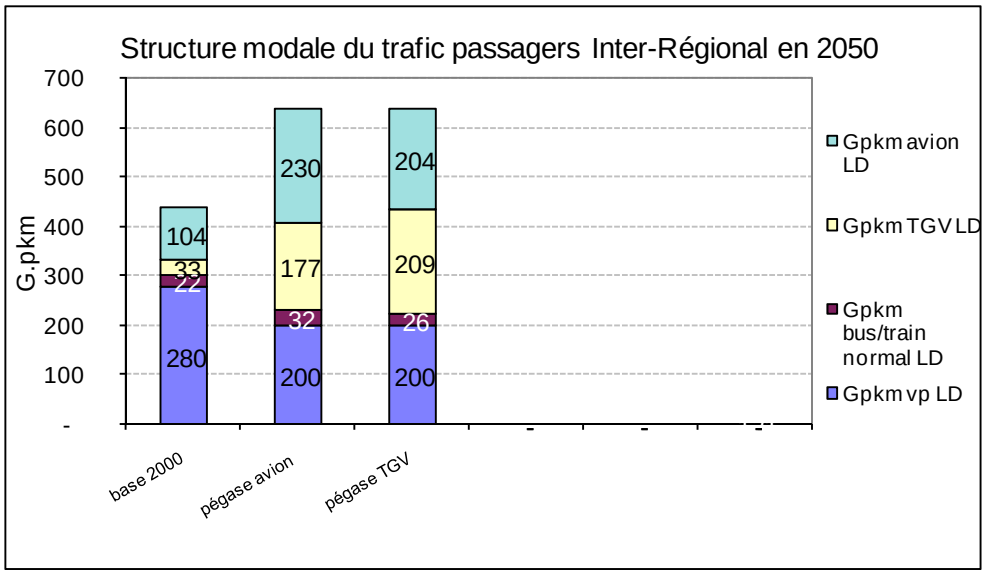
Sur les déplacements longue distance (supérieurs à 150 km), on note, dans les deux variantes, une régression de la voiture à la fois en trafic (-29%) et en part modale ou elle chute de 77% à 31%. Ce recul profite essentiellement aux modes rapides :

- dans la variante Avion, la part modale du TGV sur les déplacements longue distance progresse de 21% à 40%, dans la variante TGV, elle passe de 21% à 48%
- dans la variante Avion, la part modale de l'avion sur les déplacements longue distance (réalisés par les Français en France en Europe et dans le reste du monde) progresse de

21% à 36% (soit une multiplication par 2,3 du trafic). Dans la variante TGV, la part de l'avion passe de 21% à 32% (soit une multiplication du trafic par 2) du trafic.

Il est à noter que la variante Avion intègre une forte progression du TGV tout comme la variante TGV intègre une forte progression de l'avion.

Figure 23 : Les structure modales du transport longue distance de passagers dans Pégase



4.1.2.3 Définition des paquets technologiques

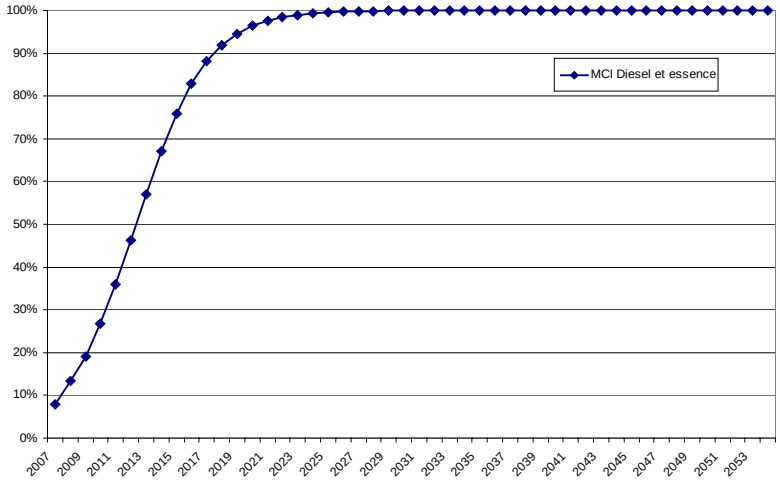
Le scénario Pégase étant avant tout un scénario dans lequel ce sont les technologies qui permettent d'atteindre le facteur 4, il est nécessaire de définir les différents paquets technologiques avec lesquels ce scénario peut être couplé.

Trois grands paquets technologiques sont considérés afin de prendre en compte tous les degrés d'effort technologique possible à l'horizon 2050 et leurs incidences sur les émissions à cette horizon. Notons ici que ces paquets et les distinctions entre les technologies concernent les technologies routières (VP, VUL, PL, Bus). Des hypothèses communes aux différents paquets sont faites concernant les progrès dans l'aérien et dans l'introduction des biocarburants.

Les deux premiers paquets sont constitués des technologies dont la probabilité de développement industriel massif d'ici 2050 peur être considérée comme forte, y compris dans un scénario tendanciel : d'une part les moteurs MCI améliorés, et d'autre part, par les hybrides *bi-énergie,* carburants et électricité. Pour ces technologies, on prend en compte des logistiques de pénétration dans le parc des véhicules neufs, dont les seuls éléments d'incertitude sont la date d'introduction sur le marché du neuf et le paramètre de diffusion sur ce marché. A partir de ces logistiques, le modèle met en évidence le facteur de réduction obtenu sur les émissions de CO2 des passagers et des marchandises en 2050.

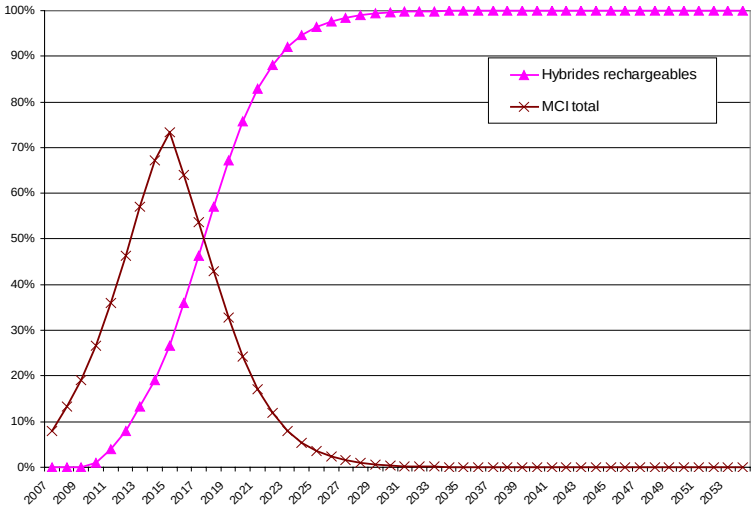
Figure 24 : Paquets technologiques 1 et 2 : exemple de pénétration

Paquet technologique n°1 :
commercialisation des mci dés 2005 / Parts en 2050 dans les immatriculations



Le premier paquet technologique suppose que seules les technologies de combustion interne se développent avec la commercialisation des MCI améliorés dés 2005.

Paquet technologique n°2 :
commercialisation des hybrides Plug-in dés 2010 / Parts en 2050 dans les immatriculations



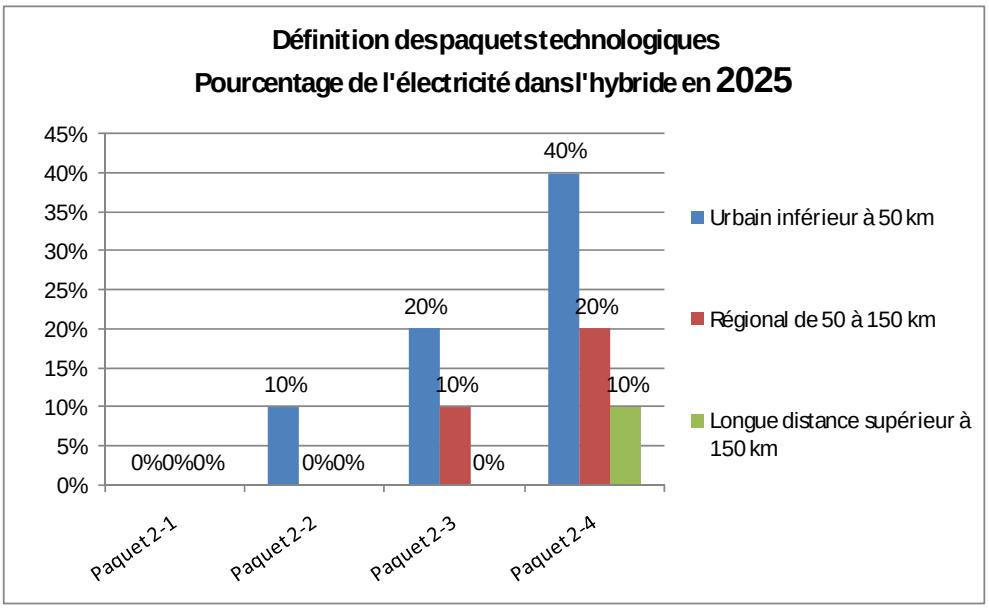
Le deuxième paquet mise sur la montée en puissance des hybrides bi-énergie à partir de 2010 puis leur généralisation en 2050. Au regard de la relation qu'entretiennent d'un côté les progrès dans les batteries (rapport volume/poids/autonomie, vitesse de recharge, durabilité, etc.) et dans l'autonomie qu'il confère aux véhicules bi-énergie, de l'autre le rapport de consommation entre l'électricité de réseau et les carburants qui en découle, selon les usages de la voiture, il est nécessaire de prendre en compte les différents degrés d'autonomie des batteries.

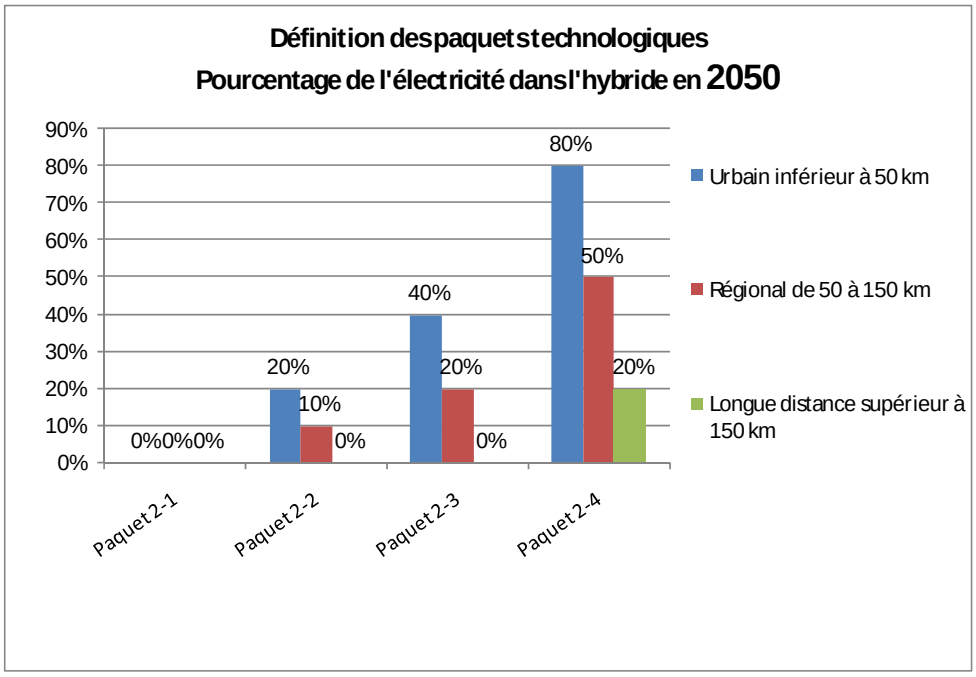
Par conséquent, on a considéré ainsi 4 sous-paquets du paquet 2.

- **Le premier sous-paquet** testé (paquet 2-1) est le plus minimaliste des quatre et correspond à une généralisation, dès 2010 dans le parc automobile, des véhicules hybrides non rechargeable, de type Prius actuelle à l'horizon 2050.

- **Le dernier sous-paquet testé (paquet 2-4**) est le plus ambitieux sans pour autant être irréaliste. Il correspond à une généralisation, dès 2010 dans le parc automobile, des véhicules hybrides rechargeables ayant une autonomie de batterie de 100 km.
- **Les sous-paquets technologiques 2-2 et 2-3** introduisent les véhicules hybrides rechargeables à des niveaux d'autonomie intermédiaire : 20 km pour le paquet 2-2 et 50 km pour le paquet 2-3. Ces deux sous-paquets intermédiaires permettent d'apprécier les gains marginaux de réduction liés à un meilleur rendement des batteries.

Figure 25 : Le recours à l'électricité pour les hybrides rechargeables bi-énergie





Le troisième paquet technologique est constitué d'options plus incertaines à l'horizon 2050, à savoir la maîtrise des piles à combustibles et de la filière hydrogène. On ne sait pas évaluer de façon robuste des dates de pénétration de ces technologies dans le marché du neuf, mais on s'intéresse en revanche à identifier quelles devraient être ces dates et les dynamiques de pénétration correspondantes de manière à atteindre l'objectif facteur 4 en 2050 (démarche back-casting).
Ce paquet est composé d'un mix :

- de véhicules neufs équipés de PAC hydrogène PAC à hauteur de 70% des immatriculations
- de véhicules électriques purs non hybridé à hauteur de 30% des immatriculations.

Pour l'ensemble des paquets et sous-paquets technologiques, ce sentier technologique considère :

- 35% de biocarburants,
- une réduction des émissions de CO2 de 35% par pkm avion ce qui correspond aux fourchettes de réduction considérées par les industriels en restant dans le même

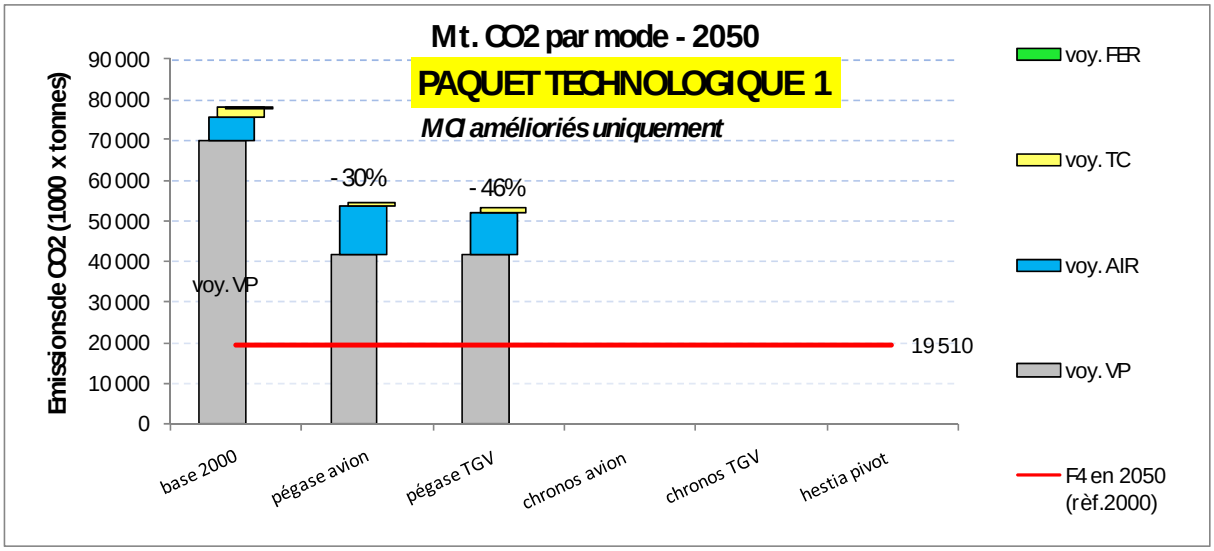
4.1.2.4 Les projections d'émissions directes dans les scénarios Pégase

- **Pégase et le paquet 1 : une vision doublement tendancielle**

Une première vision de la technologie dans Pégase est plus ou moins en phase avec les calendriers industriels des constructeurs automobiles notamment européens. Bien que l'environnement de contraintes évolue rapidement, ces calendriers industriels ne l'ont pas totalement pris compte et encore moins traduit dans une stratégie industrielle pour plusieurs raisons. D'une part parce que l'environnement réglementaire n'existe pas réellement pour les constructeurs, la Commission étant en train de mettre en place les futurs dispositifs pour 2012, d'autre part parce qu'il existe des inerties dans le timing de lancement des nouveaux modèles déjà programmés à un horizon de 4 à 5 ans, enfin, parce que les délais d'adaptation des chaines de montage ne permettent pas de passer rapidement à la production de véhicules hybrides.

Notons également que cette vision industrielle correspond à un certain paradigme d'utilisation de la voiture comme un objet polyvalent en particulier optimisé pour les trajets régionaux et longue distance. Cette vision actuelle et industrielle européenne dont la stratégie reste fondée sur l'optimisation des moteurs à combustion interne (MCI) correspondent à la généralisation des véhicules dont les consommations de 5,18 litres de diesel en courte distance et 4.8l en longue distance. En faisant l'hypothèse conservatrice que nous restions dans cette vision, ou nous conduirait-elle au regard de l'objectif du facteur 4 ?

Figure 26 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquet technologique 1



Le paquet technologique associé au scénario tendanciel n'atteint pas le facteur 4. Dans les deux variantes, les émissions liées aux modes routiers représentent respectivement 77 et 79% des émissions totales et à elles seules plus du double du facteur 4. Atteindre le facteur 4 dans ces conditions supposerait de supprimer plus de la moitié des trafics routiers passagers ainsi que les trafics aériens, l'effort hors technologie serait par conséquent disproportionné (et sans doute supérieur en prenant en compte les émissions indirectes et les émissions des marchandises). Dans Pégase avion la baisse des émissions est de 30% alors qu'elle devrait être de 75%. L'effort est 2,5 fois moindre que celui nécessaire. Dans Pégase TGV, la baisse des émissions est de 46%.

Cette vision « doublement » tendancielle, à la fois sur les trafics (scénario Pégase) et sur les technologies (parquet 1 MCI) ne permet en aucune mesure l'atteinte du facteur 4 pour les transports passagers compte tenu du poids de la route dans les émissions. L'action réglementaire de la commission destinée à infléchir ce sentier technologique est plus que nécessaire et urgente à mettre en œuvre de sorte que les constructeurs disposent des délais suffisants pour intégrer ces contraintes réglementaires dans leurs stratégies industrielles.

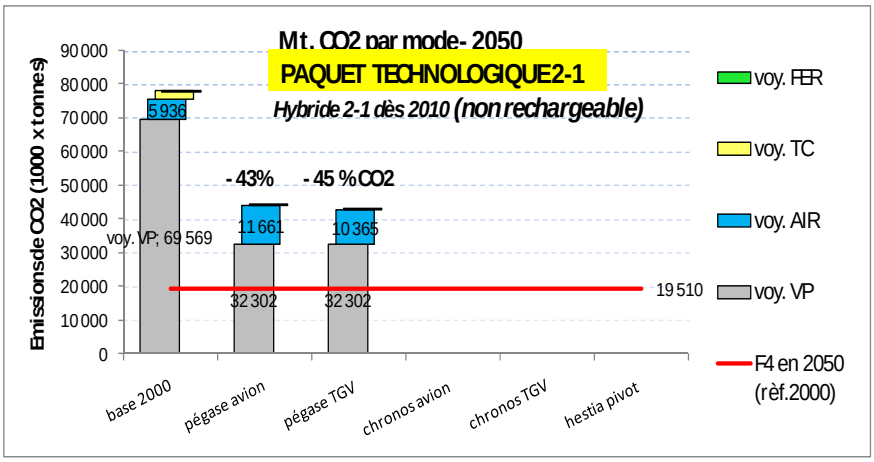
- **Pégase et le paquet 2 : une vision tendancielle optimiste mais raisonnable**

L'examen du scénario tendanciel a montré la nécessité d'envisager au minimum le paquet 2 dans les scénarios de mobilité durable. Ce sentier technologique est considéré comme « raisonnable » dans le contexte du facteur 4. Les quatre versions du paquet technologique 2 sont examinées en première instance, pour les deux variantes de Pégase. Les émissions de CO2 résultent d'une part, du degré d'efficience technologique du paquet utilisé et en l'occurrence du degré d'autonomie des batteries, d'autre part, de la progression des trafics enregistrée dans les deux variantes et de la structure modale associée.

Le paquet 2-1 met en évidence une baisse sensible des émissions de CO2 pour les passagers, de l'ordre de 43% pour la variante Pégase avion et 45% pour la variante Pégase TGV alors

que le trafic total progresse de 42%. Cette baisse des émissions n'est toutefois pas suffisante pour atteindre le facteur 4 (réduction des émissions de 75% par rapport à 1990). Par conséquent, cette première configuration technologique permet d'accomplir environ la moitié de l'effort de réduction pour les passagers (en émissions directes, sans prise en compte des émissions induites dans le raffinage, le secteur électrique et la production des biocarburants).

Figure 27 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquet technologique 2.1



Comment expliquer ces baisses significatives de 43 et 45% des émissions dans les variantes du scénario Pégase obtenues avec le paquet technologique le plus minimaliste ? Cette baisse des émissions s'explique en grande partie par la forte progression des modes collectifs en urbain et en région (56% de la progression du trafic total sur ces deux zones, et 84% de la progression du trafic en urbain). Les contreparties en émissions de CO2 de cette progression du trafic sur les modes collectifs (urbain et région) sont faibles voire quasi nulles. A cela s'ajoute, une baisse du trafic VP en longue distance (-29%) correspondant à des déplacements fortement émetteurs de CO2 (car réalisés hors autonomie de la batterie).

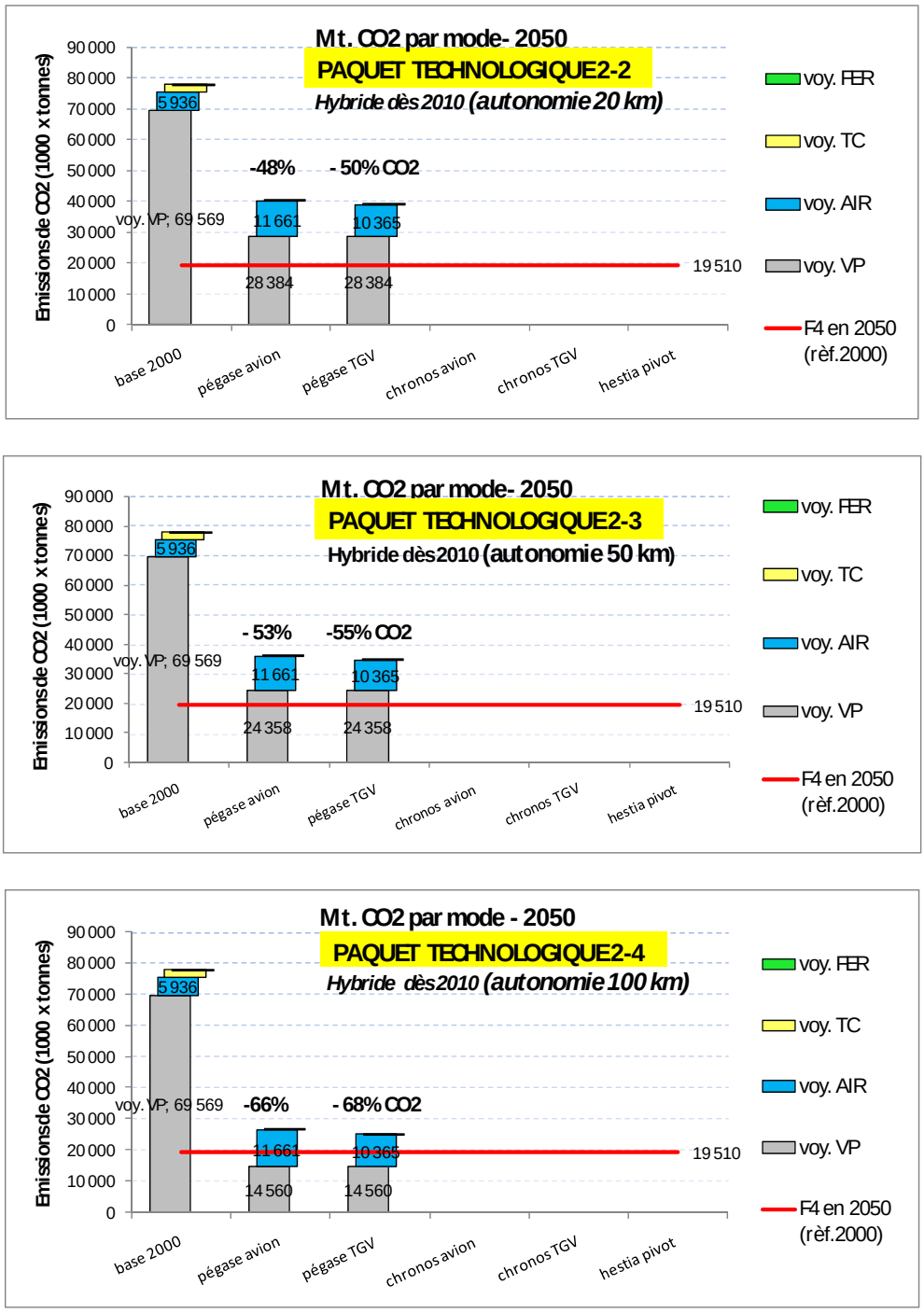
Au-delà des baisses significatives enregistrées avec un effort technologique faible, la structure des émissions de CO2 est riche d'enseignements :

- la forte croissance forte du trafic aérien (relativement au trafic routier) se traduit par une hausse de 8% à 26% de la part de l'avion dans les émissions totales. Toutefois, on notera que cette croissance des émissions aériennes ne renverse pas fondamentalement les ordres de grandeur dans la répartition des masses de CO2 par rapport à l'année 2000. En effet, les émissions de CO2 liées au trafic VP sont certes en recul : de 89% à 73%, mais elles représentent encore 3 fois les émissions de l'avion en 2050, soit de loin la source la plus importante de gaz à effet de serre. La dynamique des tendances actuelles ne doit donc pas masquer l'inertie des effets de structure.

- la voiture et l'avion se partagent 98% de la quantité de CO2 émise directement par les trafics passagers, soit la quasi-totalité des émissions. Si ces modes répondent à des besoins de mobilité différents, ils sont tous deux consommateurs d'énergie fossiles. A ce titre, on peut évoquer un possible arbitrage sur leur usage collectif au regard du facteur 4.

L'utilisation des paquets technologiques, 2-2, 2-3, 2-4 dans les deux variantes Pégase nous permet d'apprécier les gains de réduction marginaux procurés par le recours à l'électricité de réseau grâce à une meilleure autonomie des batteries toutes choses égales par ailleurs.

Figure 28 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquets technologiques 2.2 à 2.4



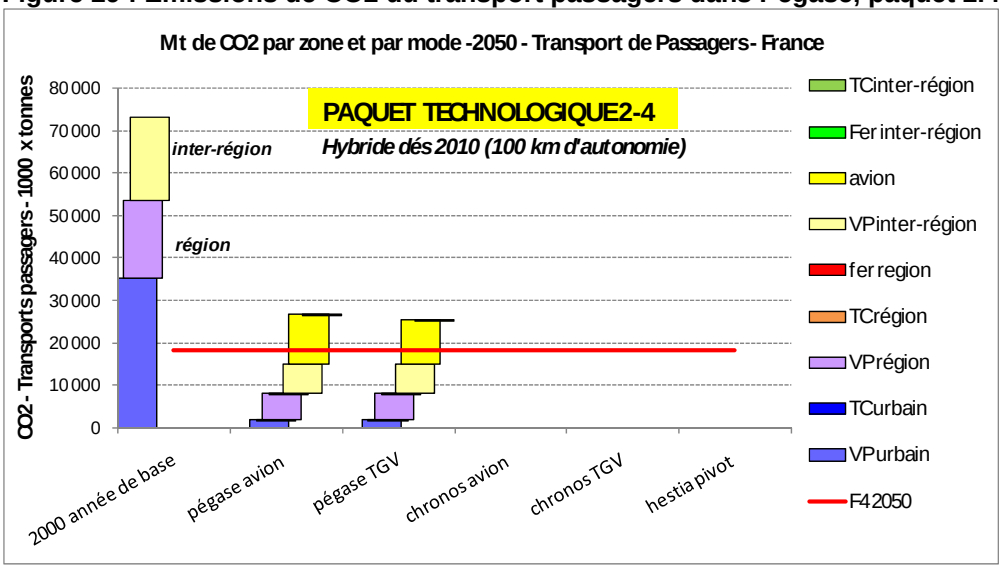
- de 0 à 20 km d'autonomie, la réduction marginale des émissions directes de CO2 par rapport au paquet 2-1 est de 5% dans les deux variantes.
- de 20 à 50 km d'autonomie, la réduction marginale des émissions directes de CO2 est de 5% par rapport au paquet 2-2, également pour les deux variantes.

- de 50 à 100 km d'autonomie, la réduction marginale des émissions directes de CO2 par rapport au paquet 2-3 est de 13% dans les deux variantes.

Le graphique ci-dessous présente la répartition des émissions des modes selon les zones dans la configuration 2-4.

- les déplacements effectués en urbain n'émettent plus de CO2 dans la mesure où ces derniers sont effectués sur l'autonomie des batteries. De même, une part significative des déplacements régionaux a basculé sur le mode électrique.
- la voiture en longue distance reste un point dur dans la réduction des émissions de CO2 car ces déplacements nécessitent l'utilisation de carburant fossile.
- l'avion représente 2/3 des émissions en longue distance.

Figure 29 : Emissions de CO2 du transport passagers dans Pégase, paquet 2.4



Au final, malgré la progression dans l'autonomie des batteries, aucune des 4 configurations technologique testées avec les deux variantes de Pégase ne permet d'atteindre le facteur 4 pour les trafics de passagers à l'horizon 2050, pour les seules émissions directes. Dans le meilleur des cas, l'effort à accomplir reste encore de 10 à 12% de réduction sur les émissions directes des seuls trafics passagers (hors trafics marchandises).
Toutefois, si l'on s'en tient aux conventions de calcul des émissions des inventaires UNFCCC, qui ne comptabilisent que les émissions du transport aérien domestique, alors le facteur 4 semble accessible pour les émissions directes du transport de passagers dans le scénario Pégase, à condition de reposer sur le paquet technologique le plus ambitieux, le paquet 2.4.

4.1.3. Les trafics de marchandises et les émissions de CO2 dans Pégase

4.1.3.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Pégase

La famille de scénarios Pégase considère que l'évolution du système de transports de marchandises est tendancielle.
Elle suppose ainsi la poursuite de la déconcentration spatiale des activités productives sur le territoire français et européen. Dans Pégase, les distances moyennes parcoures par les marchandises continuent à augmenter, et, -comme il sera expliqué plus loin- 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.

Dans la logique de TILT, les croissances des tonnes.kilomètres (nationale et du commerce extérieur) sont calculées à partir de la croissance de l'activité économique, avec des élasticités constantes. La vitesse moyenne de déplacement des marchandises est également calculée à partir de la croissance du PIB, avec une élasticité au PIB constante dans le temps.
Dans Pégase, on considère en outre que les transports urbains, régionaux et interrégionaux ont la même élasticité à la croissance économique. En revanche, le transport international a une élasticité au commerce extérieur supérieure à celle du transport intérieur.

Les élasticités à l'activité économique qui ont été utilisées pour Pégase sont les même qui ont servi au scénario tendancielle du CGPC présenté dans la partie 2. Pour l'élasticité de la vitesse au PIB, nous avons pris celle qui a été observé historiquement (études LET&ENERDATA), et nous considérons qu'elle est la même sur l'ensemble du territoire métropolitain français ainsi que pour les imports et les exports.

Dans ce scénario Pégase, TILT calcule que la vitesse moyenne de déplacement des marchandises doit passer ainsi de 43 km/h en 2000 à 54 km/h[23] en 2050 compte tenu de la croissance du PIB et de l'élasticité de la vitesse au PIB. Pour atteindre cette moyenne, 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 tendancielles du CGPC), tout en considérant des évolutions réalistes sur les vitesses par mode, en particulier pour la route. En considérant ainsi que la vitesse moyenne sur la route croît elle-même de 50 km/h (2000) à 60 km/h en 2050, alors la vitesse moyenne du rail conventionnel et des modes rapides doit passer de 40 km/h (2000) à 63 km/h en 2050. Cette évolution n'est envisageable qu'au prix d'un développement relativement soutenu des modes rapides (ferroviaire rapide et aérien, vitesse moyenne prise par convention égale à 200km/h), la vitesse du transport ferroviaire conventionnel étant considérée constante sur l'ensemble de la période.

[23] Les vitesses indiquées ici correspondent à des variations des vitesses conventionnelles considérées pour l'année de base et n'ont de signification que par rapport à ces vitesses conventionnelles de l'année de base

Tableau 11 : Hypothèses utilisées dans le scénario Pégase marchandises

	2000	2050
Vitesse route-Intérieur	50 km/h	60 km/h
Vitesse du rail-Intérieur	40 km/h	40 km/h
Vitesse du rail et modes rapides	40 km/h	63 km/h
Vitesse du l'ensemble du transport Intérieur	43 km/h	54 km/h
Elasticité vitesse/PIB		0,3
Elasticité T.Km/GDP intérieur		0,63 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur		1,6

Si nous faisons par ailleurs l'hypothèse que le transport urbain et régional de marchandises est entièrement fait par la route, la répartition modale en longue distance (pour la variante « avion ») cohérente avec le volume global de trafic et le vecteur des vitesses, est la suivante : 77% pour la route ; 11% pour le rail normal ; 2% pour la navigation intérieure et 9,5% pour le rail rapide et 0,5% pour les modes rapides. La variante « avion » du scénario Pégase représente une situation où 5% du trafic des marchandises acheminées par un mode rapide sont transportées en avion. Ainsi, dans la variante TGV, l'ensemble des tonnes des modes rapides sont acheminées par le réseau ferroviaire ce qui fait passer la part modale du rail rapide à 10%.

Ceci équivaut à une croissance de 61% pour l'ensemble du trafic, 50% pour la route ; 115% pour le rail et 43% pour la navigation intérieure.

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 du côté des marchandises à très haute valeur ajoutée.

Vitesse route-International	50 km/h
Vitesse du rail-International	40 km/h
Vitesse moyenne du rail et modes rapides international	70 km/h
Vitesse du l'ensemble du transport International	52 km/h
Elasticité vitesse/PIB	0,3
Elasticité Tkm/commerce extérieur	1,6
Part de l'avion sur les modes rapides	40%

Dans Pégase, tout repose sur un trafic international croissant avec une extension des aires de marché. Le scénario répond à une logique où nous continuons à faire des investissements allant dans le sens d'un développement fondé sur la vitesse et un coût bas du transport de marchandises. Pégase répond à une réalité où les entreprises trouvent toujours un bénéfice à la

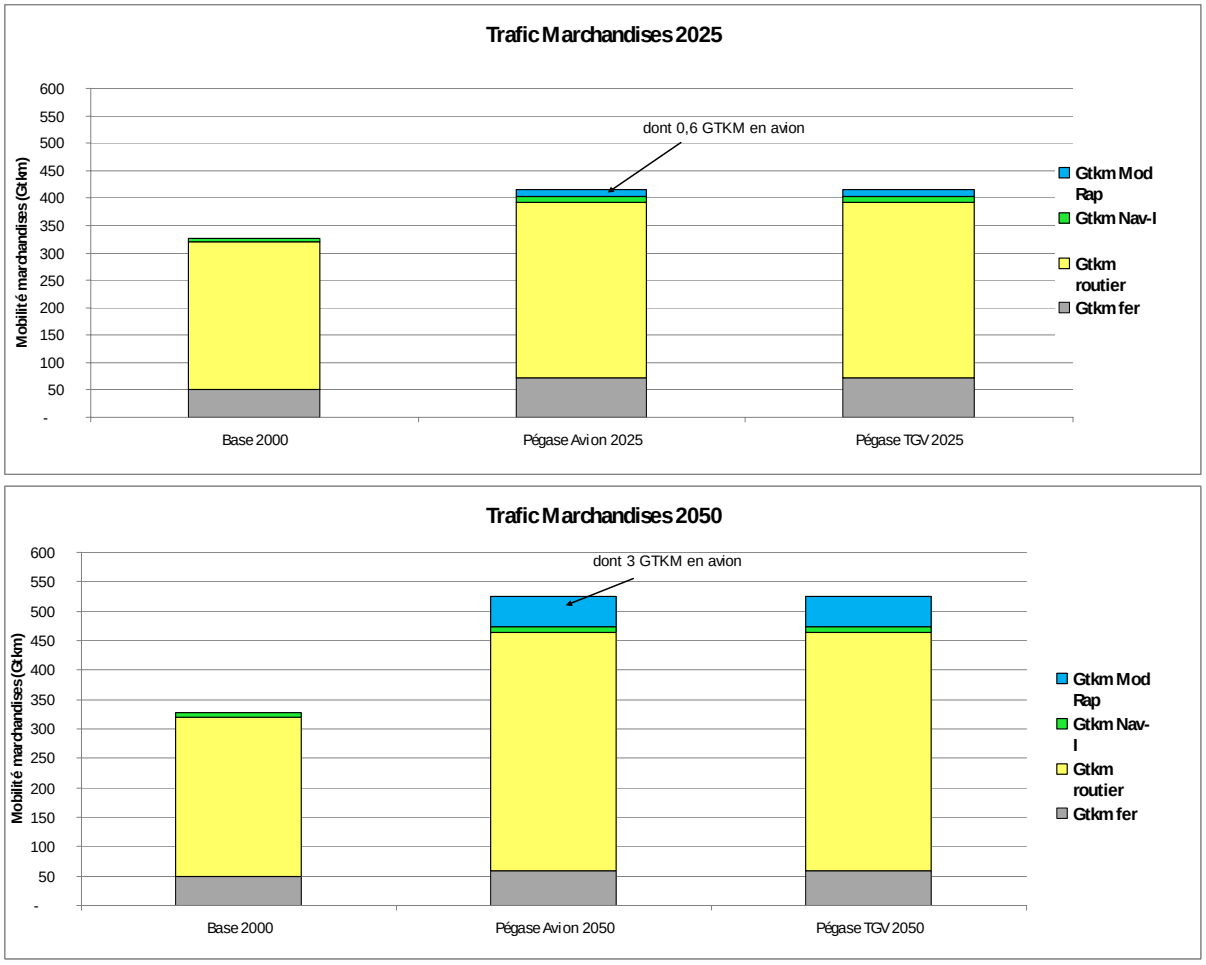
production à grande échelle avec des coûts fonciers relativement faibles proposés par les centres de production éloignées des aires de marché.

En d'autres termes, pour les entreprises, le bénéfice des économies d'échelle est toujours plus important que les économies de proximité. Elles ne trouvent donc que peu d'intérêt à la proximité ou au rationnement des distances de transport.

4.1.3.2 La projection des trafics dans les scénarios Pégase

Voici pour 2025 et 2050 les trafics de marchandises cohérents avec les projections globales du CGPC et les évolutions considérées pour les vitesses :

Figure 30 : Trafics par modes dans le scénario Pégase



Afin de rendre compte du poids que peut prendre l'aérien dans un système logistique à la recherche de plus en plus de vitesse, nous avons décliné Pégase en deux variantes :

- une première qui comptabilise les émissions liées à un transport de fret rapide se développant sur la base du rail rapide.

- une deuxième où le transport de fret rapide se développe sur la base d'une industrie de fret aérien.

Si nous explorons une petite participation (supposé de 5%) du fret aérien sur le système de transport de fret national, nous pouvons observer une très grande hausse des émissions de CO2 (ce qui est normal avec une moyenne de 0,674 kg équivalent CO2 en courte distance et 0,241 en longue distance par Tkm).

Comme nous pouvons voir dans le graphique suivant, les deux variantes de Pégase ont exactement le même trafic, la différence se fait à l'intérieur des modes rapides.

Figure 31 : Trafics marchandises dans Pégase

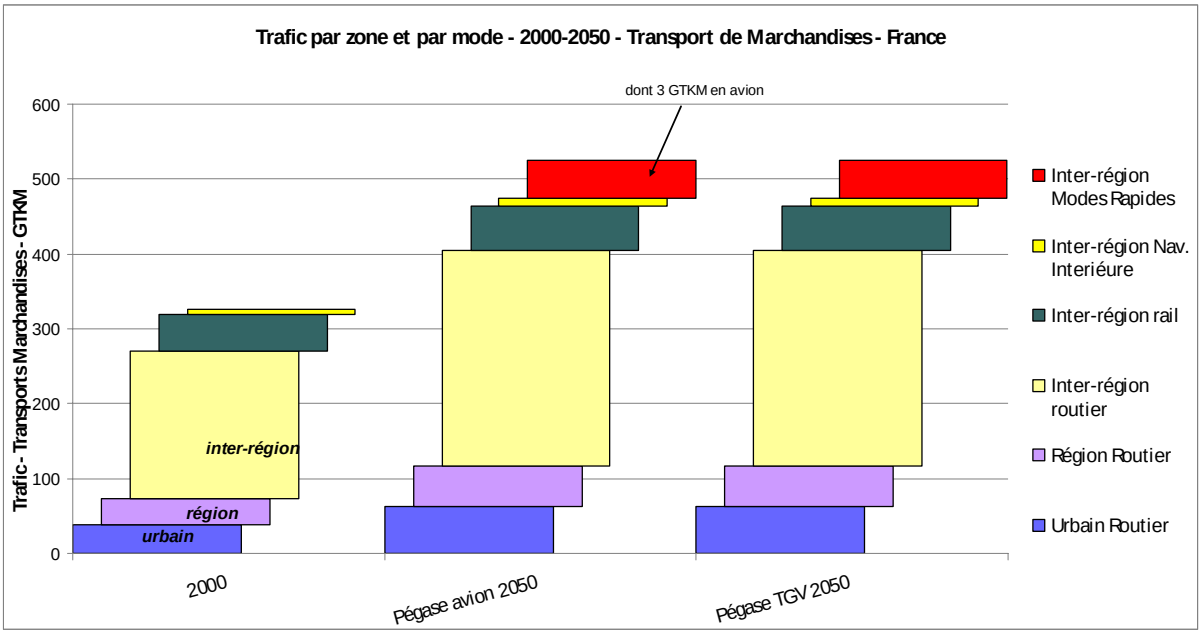


Tableau 12 : Trafics marchandises intérieurs par catégorie de services dans Pégase

Trafic Intérieur
2000-2050

GTKM	2000	Pégase avion 2050	Pégase TGV 2050
URBAIN	39	62	62
REGION	34	54	54
INTER-REGION	254	408	408
Total	327	525	525
URBAIN			
Urbain Routier	39	62	62
REGION			
Région Routier	34	54	54
	0	0	0
	0	0	0
INTER-REGION	254	408	408
Inter-région routier	197	288	288
Inter-région rail	50	59	59
Inter-région Nav. Interiéure	7	10	10
Inter-région Modes Rapides	-	51	51
dont ferroviaire rapide		49	51
dont avion		3	-

Le transport aérien représente une partie importante du trafic et des émissions au niveau international. Même si le transport maritime reste le maillon le plus important de la chaîne et, où –même si les marges de manœuvre sont relativement étroites- des recherches sur la baisse de consommation sont engagées. Nous pouvons notamment citer les récents développements d'une équipe allemande à 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 au Tkm existant entre la route et la mer est de presque 20. Soit, 1 Tkm par la route représente presque la même quantité de CO2 que 20 Tkm par la mer.

Tableau 13 : Trafics marchandises internationaux par catégorie de services dans Pégase

GTKM	2000	Pégase 2050
International IntraEurope	143	227
Routier-IntraEurope	37	15
Rail-IntraEurope	6	50
IW-IntraEurope	2	3
Avion-IntraEurope	0,13	11
Maritime-IntraEurope	98	149
International ExtraEurope	2398	7918
Routier-ExtraEurope	1	4
Rail-ExtraEurope	0	2
IW-ExtraEurope	1	4
Avion-ExtraEurope	7	23
Maritime-ExtraEurope	2388	7884

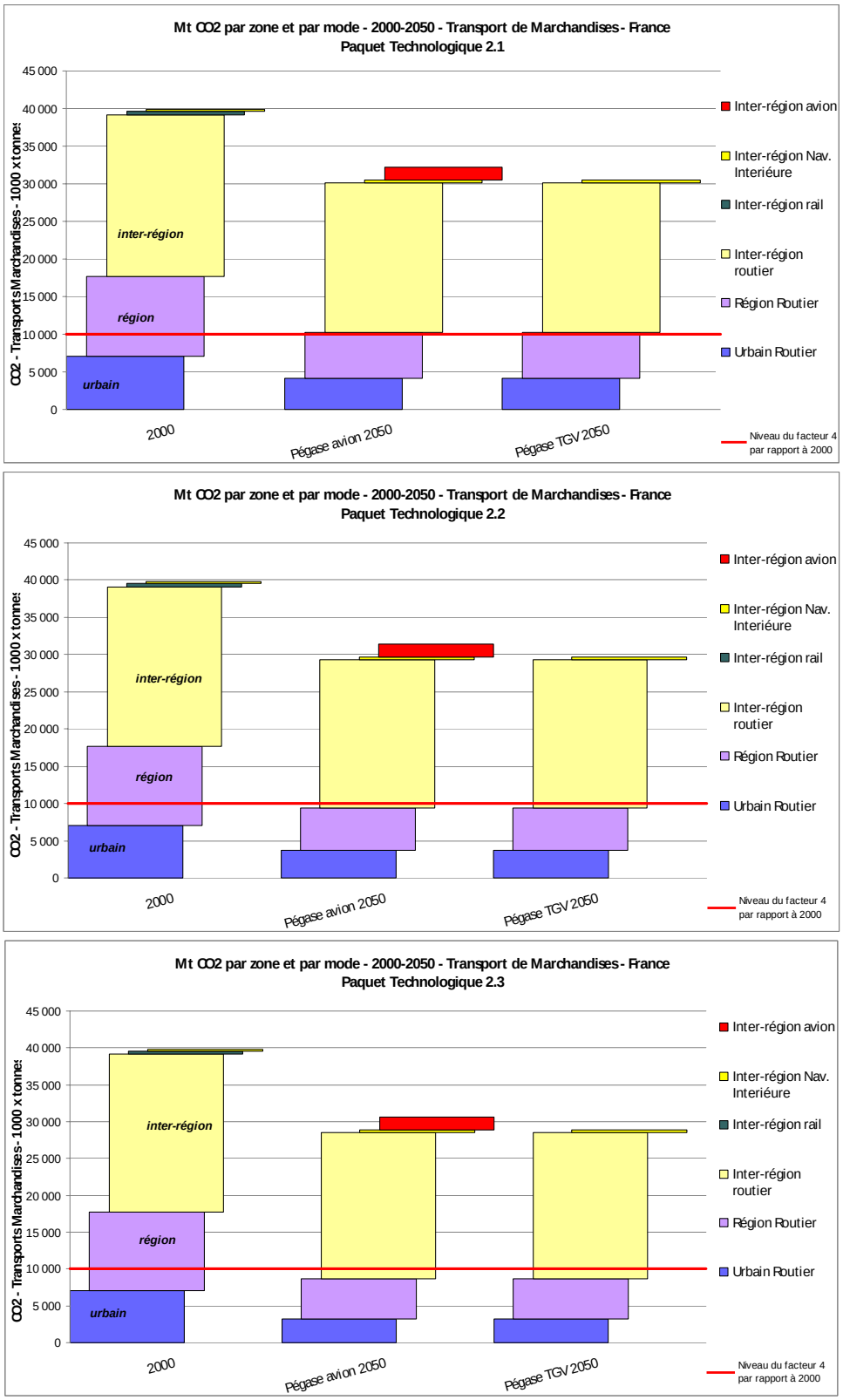
4.1.3.3 Emissions de CO2 et facteur 4 pour les marchandises dans les scénarios Pégase

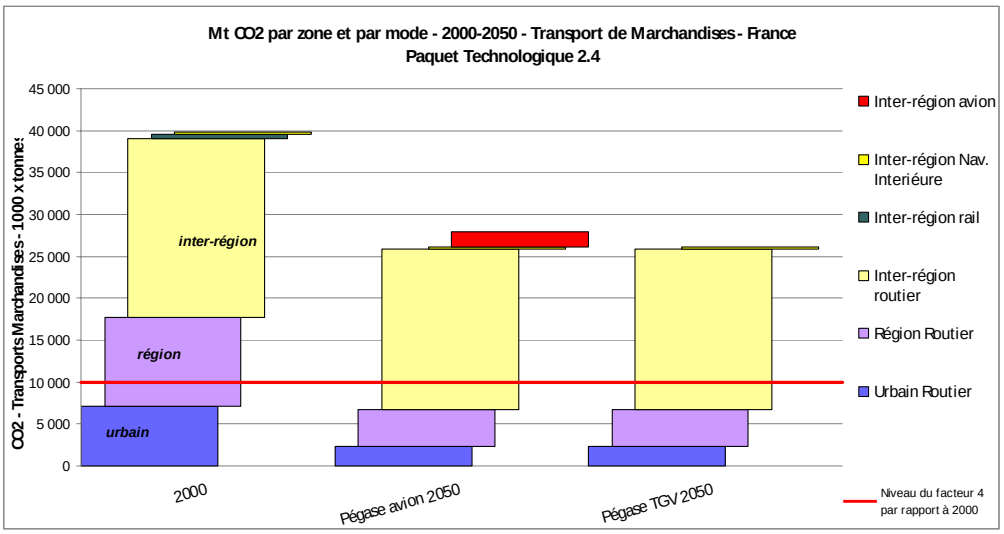
Du point de vue du développement des technologies, ce scénario permet de tirer certaines conclusions intéressantes. Du moment que les distances de parcours des marchandises continuent à augmenter et que nous couplons cela à une diminution de la concentration spatiale, la recherche et le développement en matière des nouvelles technologies de transport devraient plutôt se pencher sur des investissements concernant l'autonomie des véhicules sur de très longues distances.

Dans Pégase, la route continuera à avoir un rôle important à jouer au niveau du transport de marchandises sur des distances de plus en plus longues. Ceci devrait se traduire soit par l'établissement d'un réseau européen de approvisionnement en carburant (si changement de carburant il y a) ou sur la recherche d'une production énergétique à bord qui soit efficace.

Ce scénario est fondé sur des très grandes attentes au niveau technologique et à ce titre, nous avons voulu explorer quelles seraient les conséquences de l'entrée des technologies hybrides dans le système de transport de marchandises. Pour ce faire, nous avons, dans un premier temps, comptabilisé les effets des paquets technologiques 2.1 à 2.4 (qui ont été précédemment présentés). Dans un deuxième temps, nous avons exploré les besoins en matière de technologies à 0 émissions pour arriver à un facteur 4.

Figure 32 : Emissions de CO2 du transport de marchandises dans Pégase





Dans la logique de TILT, l'affectation des trafics aux différents modes de transport suivant les caractéristiques de chaque mode permet de faire apparaître une différenciation des impacts technologiques en fonction du poids de la route sur différentes types de service. Ainsi, le paquet technologique 2.3 et 2.4 supposent une hausse de l'autonomie des véhicules et donc une utilisation plus importante des hybrides dans l'urbain et le régional.

Si nous explorons les résultats de Pégase pour rechercher quel serait l'effort supplémentaire à fournir en matière de technologies à 0 émissions pour atteindre le facteur 4, nous arrivons à la conclusion que ces technologies devraient voir le jour au plus tard en 2030 -pour Pégase TGV- et dans les cas de la variante aérienne au plus tard en 2020. Si nous allons un peu plus loin dans le détail de ce que signifient ces dates, nous observons que pour la partie marchandises du système de transports, ceci se traduit par le fait qu'au moins 60% du parc routier (PL et VUL confondus) devrait être 0 émissions en 2050. Ces résultats seront présentés de manière plus détaillé, en le couplant avec les efforts sur le transport de passagers, dans la section suivante.

Le scénario Pégase nous apprend que le futur tendanciel sous contrainte du facteur 4 dépend complètement de l'effort qui pourra être réalisé sur les technologies et sur la date d'entrée de ces technologies. Ainsi, dans le scénario Pégase, il reste la question de pouvoir produire de l'énergie à 0 émissions dans les délais annoncés. Reste aussi la question de pouvoir contrôler l'utilisation de l'avion pour le transport de fret, probablement au profit des passagers et des seules marchandises à une très haute valeur ajoutée.

Tableau 14 : Emissions de CO2 internationales par catégorie de services dans Pégase

Mt CO2	2000	Pégase 2050
International IntraEurope	5145	21352
Routier-IntraEurope	3941	2224
Rail-IntraEurope	38	0
IW-IntraEurope	67	222
Avion-IntraEurope	120	15677
Maritime-IntraEurope	978	3229
International ExtraEurope	15534	49210
Routier-ExtraEurope	142	290
Rail-ExtraEurope	3	0
IW-ExtraEurope	47	154
Avion-ExtraEurope	2281	5648
Maritime-ExtraEurope	13061	43118

4.1.4. Comment vit-on dans Pégase en 2050 ?

4.1.4.1. Petites histoires de passagers…

MARIE et HERVE, une famille de banlieusards typique de PÉGASE

Marie et Hervé ont choisi de garder leur petite maison aux alentours de Roanne (42). Même en étant à 70 km de leur lieu de travail, ils continuent à profiter du jardin avec leurs enfants et des promenades en vélo le dimanche.
Néanmoins, la vie quotidienne dans les transports est devenue difficile à endurer pour la plupart des habitants en périphérie des villes. Le temps passé à se déplacer n'a pourtant pas augmenté mais le sentiment de s'y ennuyer et d'y perdre son temps a, lui, été démultiplié.
Tous les matins, Marie et Hervé, comme la plupart des habitants de leur lotissement, sont obligés d'utiliser leur voiture bon gré mal gré pour se rendre à Lyon, les TER n'ayant pas su se moderniser et offrir une véritable alternative au transport individuel pour les transports régionaux. Comme le répète Hervé, les TER en sont restés au stade de 2010 ! Tout juste une connexion wifi permet de consulter internet. Heureusement que les cachets à sommeil immédiat à dosage variable permettent de rentabiliser son temps en dormant le temps souhaité entre les gares de départ et d'arrivée selon la dose prise.
La voiture permet de mieux gérer son temps que le TER mais pas de dormir pour autant. Heureusement, que la Prius hydride de 5ème génération offre à Marie une prise en charge semi automatique de la conduite sur certaines portions routières. C'est un réel soulagement tant, chaque matin, elle supporte de moins en moins les embouteillages pour rallier, depuis Roanne, l'agglomération lyonnaise. L'autoroute, terminée en 2011 puis doublée en 2035 n'a malheureusement pas résolu le problème ; alors que c'est précisément ce qui avait décidé Marie et Hervé à aller vivre en périphérie de Lyon ! Grâce à la modernisation des infrastructures, la multiplication des contournements de villes, le doublement des portions restreintes, et l'optimisation en temps réel des trajets, la voiture reste cependant la solution transport la plus simple et la plus rapide en porte à porte. Néanmoins, on s'y ennuie plus que jamais ! Et quelle frustration tant les activités autres que celle de conduire se bousculent dans les 24 petites heures quotidiennes. Alors que les constructeurs proposent désormais de multiples activités embarquées, sans compter les périphériques musicaux, les livres électroniques permettant d'accéder à tout instant à une bibliothèque universelle etc., les conducteurs n'ont plus la tête, le temps et l'envie de conduire. L'explosion de ces distractions embarquées a provoqué une multiplication des accidents et plonge l'usage de l'objet « automobile » tel qu'il a été utilisé depuis un siècle se trouve désormais dans l'impasse. La solution que représente la conduite automatique implique la généralisation des routes permettant une prise en charge du véhicule à 100%. Car c'est désormais le seul moyen et le seul espoir pour les conducteurs de faire reculer ce sentiment omniprésent de perdre ce temps en voiture. Mais en 2050, cette généralisation tarde à venir pour des raisons de coûts du système et de problèmes juridiques de responsabilité en cas d'accident que ni les constructeurs, ni les équipementiers ne souhaitent assumer à la place des conducteurs...

Quant à la voiture à hydrogène, elle ressemble à l'arlésienne du moins pour les classes moyennes. Tout juste commence-t-elle à se diffuser auprès de quelques « happy few ». Le réseau hydrogène tarde à se mettre en place malgré la communication des constructeurs automobiles sur l'atout écologique de ces voitures. Bref, en attendant l'économie hydrogène, monsieur tout le monde roule en hybride de 4ème ou 5ème génération ce qui lui permet une

autonomie de 80 à 100 km pour ne pas consommer de carburant mais ce qui ne lui permet pas de réaliser l'ensemble des trajets sur la batterie.

Ce soir, de retour du travail, Marie et Hervé abordent la question des futures vacances. Marie aimerait bien partir en Espagne pour se dépayser…bonne idée pour Hervé mais comment y aller ? Le train à grande vitesse reste cher et l'avion reste intéressant même pour les destinations européennes proches bien que paradoxalement, il soit dénoncé par tous comme anti-écologique. Quant à la voiture, bien que trop coûteuse en carburant et en temps, elle reste encore adaptée aux longues distances surtout pour les retraités qui y restent attachés.

Ce week-end, comme tous les 15 jours, la famille ira rendre visite aux grands parents des enfants qui vivent à Grenoble. La petite famille prendra la Toyota hybride faute de pouvoir utiliser d'autres moyens de transport comme le TER, lent et cher. Le grand père les attendra à la gare de Grenoble en voiture. A 102 ans, la conduite assistée en ville ne lui pose aucun problème. Certes, son Hummer à moteur V8 hybride est un peu large pour les petites rues de Grenoble mais il ne s'en plaint pas tant le confort et le sentiment de sécurité qu'il procure y sont décuplés pour une consommation somme toute faible de 6 litre d'essence au 100 km !

ALICE, jeune active parisienne, figure emblématique des scénarios PÉGASE

Le personnage emblématique de la famille de scénarios Pégase est une femme. Jeune, diplômée et active, elle habite Paris ou sa proche banlieue. Célibataire mais inscrite, avec son ami, dans une multitude de réseaux sociaux, elle a intégré la nouvelle géographie française et européenne, celle des TGV et des compagnies Low Cost. Très au fait des offres promotionnelles sur internet, toujours branchée sur son téléphone portable pour planifier les sorties entre amis ou les visites à la famille, Alice n'a pas jugé utile d'acheter une voiture. D'ailleurs, plusieurs de ses amis n'ont même pas le permis de conduire. Dans sa ville, équipée d'un bon réseau de transports en commun, de plusieurs gares TGV et aéroports, elle utilise les TC. Pour ses déplacements du week end, elle loue parfois une automobile mais, le plus souvent, elle prend le train ou l'avion. Elle fait d'ailleurs chaque année quelques week-end prolongés dans une capitale européenne ou en Afrique du Nord. Elle fait ainsi plus de 30 000 km par an pour ses loisirs et relations familiales, ses émissions de CO2 sont considérables, presque exclusivement pour ses déplacements en avion

4.1.4.2 *Comment transporte-t-on les marchandises ?*

Evénements, législation et décisions	**Analyse économique**	**Technologie**	**Collecte**	**Distribution**	**Inter-entreprise**
Toute l'industrie automobile a été contrainte à une réorganisation massive avec l'adoption de la nouvelle propulsion hybride/électrique, dès 2010 Les perspectives de l'industrie automobile sont apparues bien sombres quand la Directive sur le transport soutenable a été adoptée: la concurrence accrue entre les fabricants et le risque de contraction du marché de la voiture neuve ont eu comme conséquence la détérioration des conditions de salaire pour toutes les catégories de personnel, y compris les ingénieurs. L'explosion de l'internet révolutionne le travail et les habitudes commerciales à la fin du millénaire. En particulier, elle a ouvert de nouvelles possibilités techniques	De plus en plus de personnes achètent sur internet mais les achats en grande surface sont toujours importants. Les produits exotiques sont de plus en plus courants. D'un point de vue macro-économique, la hausse des coûts des transports routiers a un certain effet inflationniste, qui est néanmoins limité par la concurrence des chemins de fer; bien sûr, cet effet inflationniste est compensé par un effet déflationniste résultant de la diminution du coût social dû au transport routier (notamment les externalités environnementales), non entièrement couverte par les impôts sur les carburants et les péages routiers, lesquels sont compensés par des réductions de taxes sur le travail, les revenus et la valeur ajoutée. La contribution du secteur des transports au PIB	Les technologies devront faire la plupart de l'effort de réduction d'émissions. Les producteurs et les distributeurs affichent leur taux de CO2 pour montrer qu'ils sont propres & technologiques. Cela devient un moyen de communiquer sur la responsabilité et le modernisme des entreprises. Les PL et VUL électriques rentrent dans le marché mais l'utilisation de ces véhicules est intégrée pour palier les politiques visant la réduction de consommation de pétrole. Des lourds investissements en matière d'infrastructure ferroviaire rapide sont réalisés visant le marché des marchandises à haute valeur ajoutée. Le secteur du transport des marchandises	C'est le *statu quo*, la collecte de marchandises se fait grâce à des centres de collecte situés près des axes de transport. Les nouvelles technologies facilitent le transport et la logistique de manière importante. Comme le marché est de plus en plus conscient du contenu énergétique des produits, les producteurs et distributeurs font pression sur les transporteurs pour qu'ils essayent 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 arrivent en train où en fluvial et le dernier trajet se fait en utilisant des véhicules hybrides	Une logique de massification et d'optimisation 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 en rail. Le transport maritime est utilisé en combinaison avec des liaisons ferroviaires et des voies navigables pour réduire les kilométrages en PL. Le transport urbain des marchandises est, quand il est possible, réalisé par des véhicules électriques. Toutefois, une forte différenciation dans le service du transport est observée au niveau des véhicules utilisés selon la nature du fret et les besoins en matière de service. Les véhicules électriques, ayant une	La hausse substantielle des coûts au kilomètre des véhicules routiers assurant un service en JAT rend celui-ci moins intéressant économiquement pour les pondéreux et les produits semi-finis. La performance des entreprises ferroviaires est devenue un facteur très important de la chaîne logistique dans ce secteur, avec quelques acteurs importants sur le marché proposant des chaînes intégrées de plus en plus fiables. La valeur en CO2 par tonne ainsi que la vitesse moyenne et le coût sont les valeurs mis en valeur par les prestataires de services de transport pour remporter des contrats. Le 3PL devient de plus en plus courant. Les logisticiens font le calcul du coût d'opportunité par rapport au niveau de service selon la nature

pour optimiser l'utilisation de toutes les ressources intérieures et extérieures des entreprises. La logistique et l'organisation apparaissent comme les sources nouvelles et essentielles d'une productivité accrue. Les entreprises de transport de marchandises proposant des services 3PL (third party logistics) connaissent une grande expansion. Désormais, le 3PL est dans la bouche de la plupart des logisticiens, qui trouvent dans la sous-traitance de la logistique à des transporteurs (qui ont crée des chaînes logistiques intégrées) un moyen de optimiser le transport tout en minimisant leurs coûts.	augmente, alors que celle des services publics diminue dans des proportions semblables. - toujours d'un point de vue macro-économique, la demande de transport résultant de l'activité économique est entièrement satisfaite, ce qui ne signifie aucune rétroaction négative du secteur des transports sur l'ensemble de l'économie. 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 vers les services de transport ferroviaires.	compte fortement sur l'annonce de nouvelles avancées technologiques qui permettront aux nouveaux PL et VUL à l'hydrogène de voir le jour pour faire baisser l'empreinte énergétique.	et électriques. Tout le système est optimisé pour offrir un service sur et rapide.	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 de faire le trajet sans rupture de charges.	du fret et le comparent au coût de la tonne de CO2. L'effort des réductions d'émissions est plutôt porté par les marchandises à faible valeur ajoutée au niveau régional et interrégional. Le transport interrégional pour les marchandises à faible valeur ajoutée permettra au transport ferroviaire de connaître un nouvel essor. Des chaînes logistiques intégrées maritime/rail/route sont la norme.

4.1.5. Les enseignements de Pégase pour le facteur 4 et les politiques publiques

4.1.5.1 La mobilité durable dans les scénarios Pégase

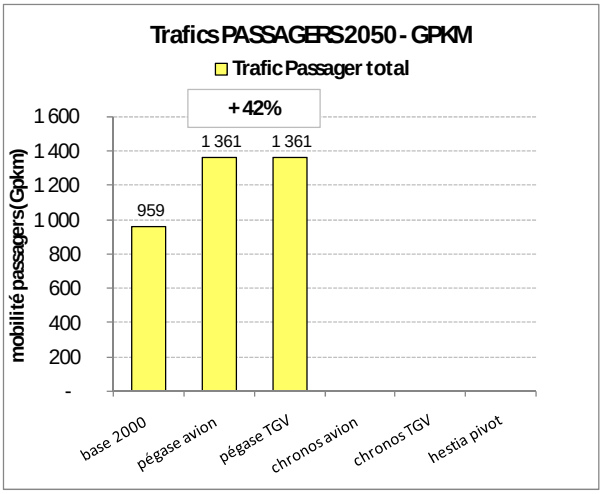
On s'attache ici à globaliser les projections d'émissions de CO2 auxquelles conduisent les différents paquets technologiques « raisonnables » pour les passagers et les marchandises, en prenant en compte les émissions indirectes liées aux différentes filières du puits à la roue.

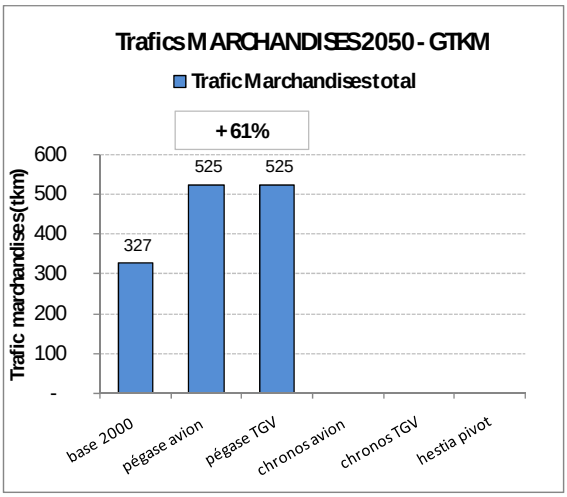
Deux aspects seront traités dans cette présentation :

- Où nous conduisent les trafics « PÉGASE » et les technologies du paquet 2 au regard des émissions de CO2 du système de transport ?
- Que faudrait-il faire en plus, si besoin, pour atteindre globalement le facteur 4 dans ces scénarios PÉGASE ?

Les émissions directes de CO2-énergie des transports n'atteignent pas le facteur 4

Le graphique ci-dessous récapitule les projections de trafic des personnes et des marchandises:

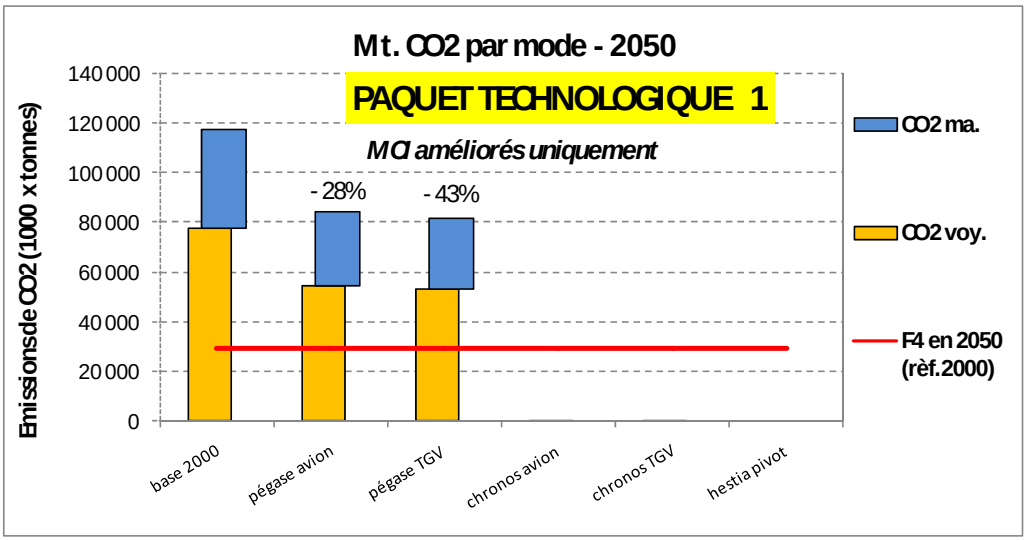




Ces augmentations de trafic vont de pair avec une baisse des émissions de CO2, toutefois moindre que celle constatée pour les seules émissions directes du transport de passagers. Ce constat est valable quelque soit le paquet technologique utilisé.

Le paquet technologique 1 (MCI améliorés) déjà testé pour les passagers ci-dessus et prolongeant les visions de l'industrie aujourd'hui pour tous les véhicules routiers (VP, VUL, PL) aboutit aux résultats suivants :

Figure 33 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 1



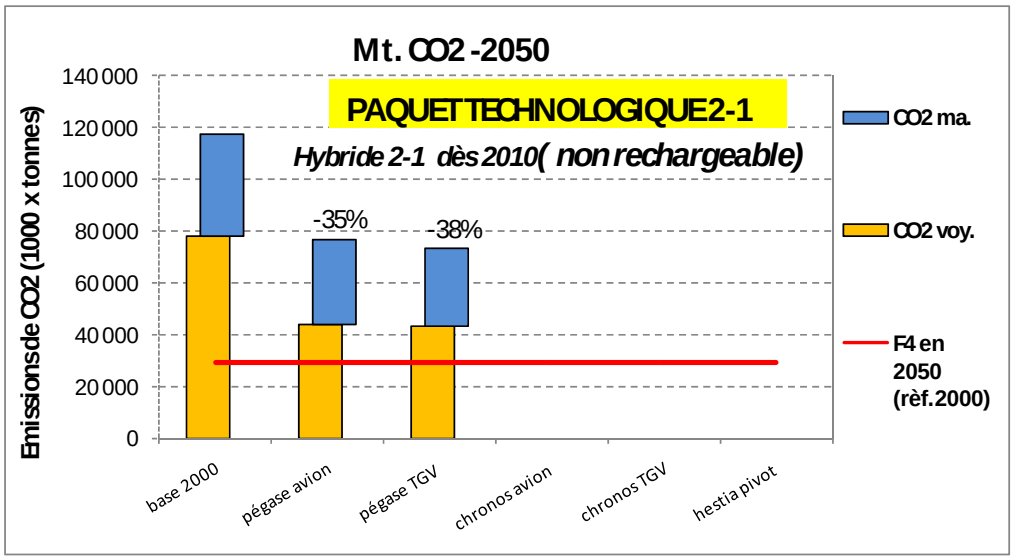
Les réductions obtenues sont moindres que pour les seuls passagers. Cette vision technologique 2050, qui représente le moindre effort, exclu l'atteinte du facteur 4 dans tous les cas et ce quelque soit le degré d'effort complémentaire ne relevant pas de la technologie. En effet, la suppression totale du trafic de marchandises ne permettrait pas d'atteindre le facteur 4 et devrait être complété par la suppression de 50% du trafic routier des VP, ce qui représenterait 50% du trafic des VP en 2000.

Le paquet technologique 2 dans sa première variante 2-1, qui correspond à une généralisation des véhicules et camions (PL et VUL) hybrides non rechargeables dans le parc en 2050, conduit aux réductions suivantes :

- réduction de 35% des émissions directes de CO2 dans la variante Avion intégrée (contre 43% pour les seuls passagers),
- réduction de 38% dans la variante TGV intégrée (contre 45% pour les seuls passagers).

Le transport des passagers représentent 58% des émissions directes de CO2 en 2050, et celui des marchandises 42%.

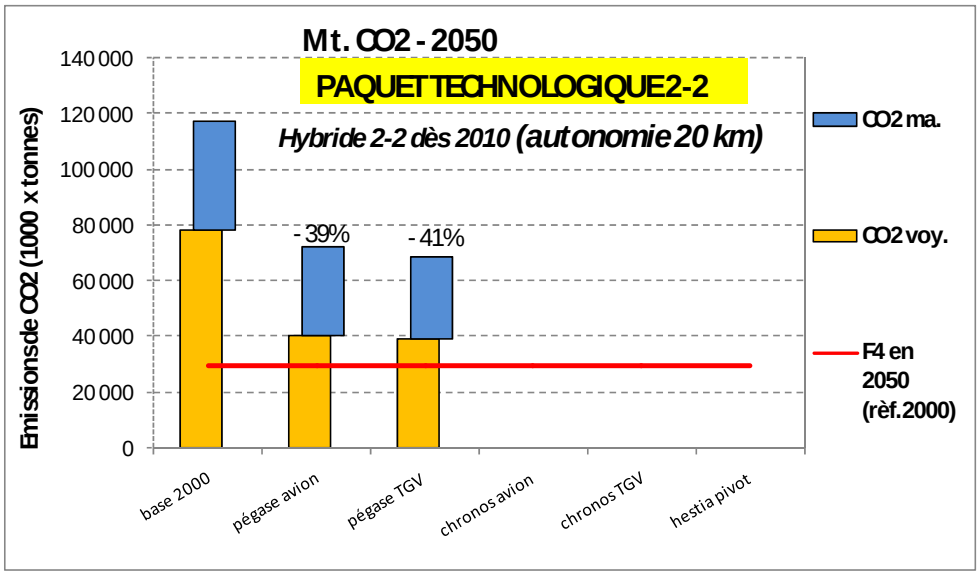
Figure 34 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-1



On constate qu'en intégrant les marchandises, l'écart à la cible augmente d'environ 7 à 8 points de pourcentage pour ce qui est du premier paquet technologique par rapport aux seuls transports de passagers. Les paquets 2-2, 2-3, 2-4 confirment ce constat.

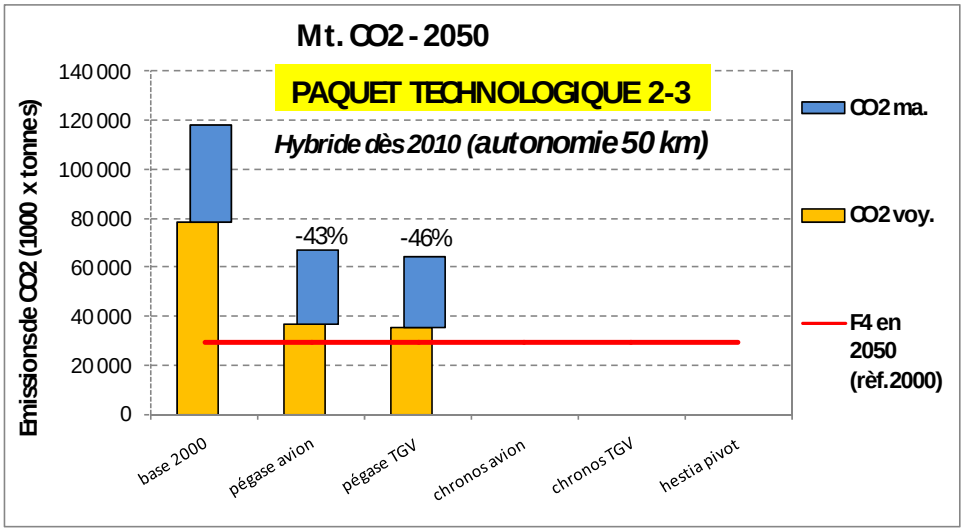
Dans le cas du paquet 2-2, correspondant à une généralisation des hybrides rechargeables bi-énergie avec faible autonomie, la réduction des émissions directes totales atteint respectivement 39% et 41% en 2050 selon les variantes, avec toujours un écart plus accentué (9 point) par rapport à l'objectif facteur 4 que pour les seuls transports de passagers.

Figure 35 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-2



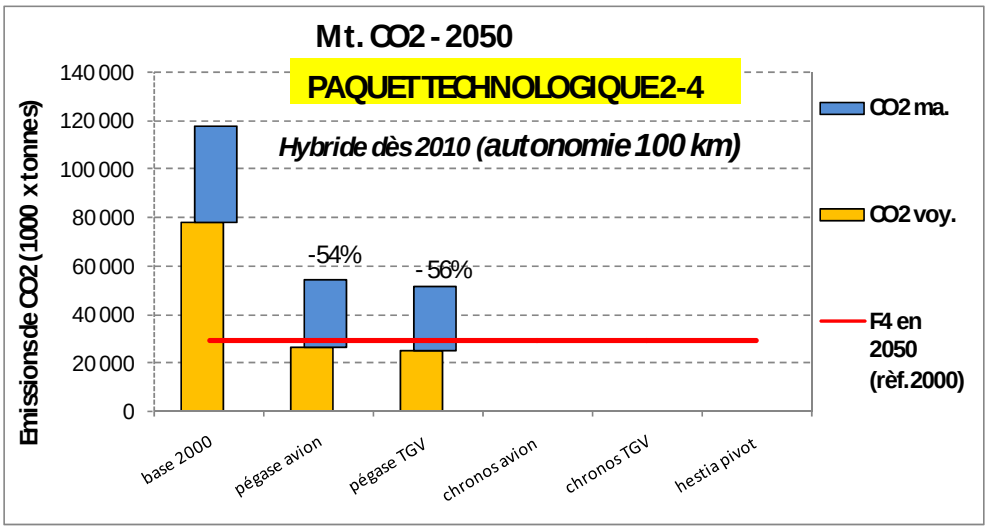
Dans le cas du paquet 2-3, correspondant à une plus grande autonomie des batteries, les réductions d'émissions directes atteignent respectivement 43% et 46% selon les variantes ; l'écart à l'objectif augmente de 10% et 11% sur les variantes Avion et TGV par rapport à aux seuls trafics passagers.

Figure 36 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-3



Dans le cas du paquet 2-4, où l'autonomie des batteries est forte, les réductions d'émissions directes totales des transports plafonnent à 54% et 56%, l'écart à l'objectif F4 augmentant de 12% sur les deux variantes par rapport aux seuls trafics passagers. Cette configuration ramène la part des trafics passagers à 50% des émissions directes totales.

Figure 37 : Emissions directes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-4



Aucune des configurations technologiques reposant les technologies hybrides rechargeables bi-énergie ne permet d'atteindre le facteur 4 pour les seules émissions directes de CO2 dans un scénario tendanciel intégré de progression des trafics passagers et marchandises à l'horizon 2050. Dans le meilleur des cas, c'est à dire dans le cas d'une commercialisation dés 2010 des hybrides rechargeables avec 100 km d'autonomie (de manière à obtenir une généralisation de ces véhicules dans le parc (VP, PL, VUL) en 2050), l'écart à l'objectif facteur 4 reste de 21% dans la variante Avion et 19% dans la variante TGV. On peut en déduire, qu'en restant dans ce paradigme technologique et en maintenant une progression tendancielle des trafics, seul un

facteur 2 peut être atteint à l'horizon 2050. L'effort technologique compte alors au maximum pour 50% dans l'effort total nécessaire.

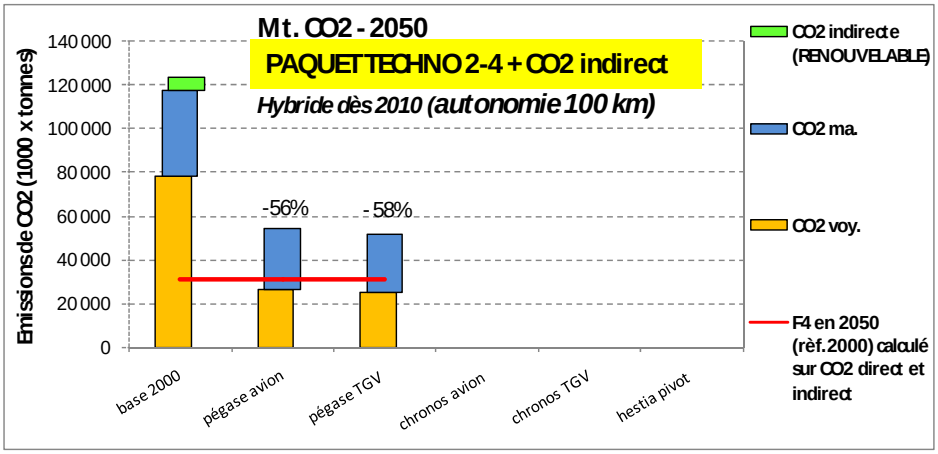
Bien sûr, si on s'en tient aux modalités comptables des émissions de l'UNFCCC pour l'aérien, on se rapproche nettement de l'objectif F4 dans cette configuration, sans toutefois l'atteindre véritablement. En revanche, si, contrairement à l'UNFCCC, on réintègre aussi les émissions du transport international de marchandises, on s'en éloigne fortement.

La prise en compte des émissions indirectes nous éloignent un peu plus du facteur 4

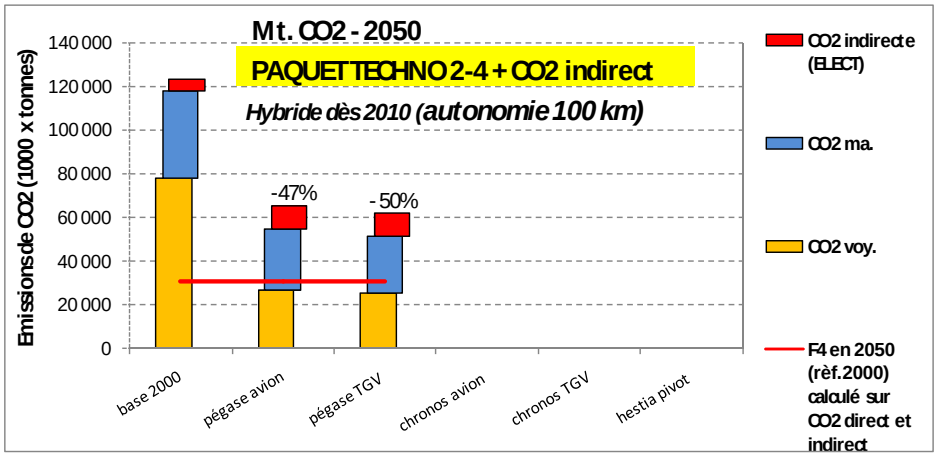
La prise en compte des émissions indirectes du raffinage, de la production d'électricité et de la production de biocarburants nous éloigne sensiblement de l'objectif F4.

Si l'électricité utilisée par les hybrides rechargeables bi-énergie est entièrement fournie par du nucléaire ou des renouvelables (solaire photovoltaïque notamment), la baisse des émissions directes et indirectes atteint au mieux 58%, contre 56% pour les seules émissions directes (variante TGV couplée avec le paquet technologique 2.4)

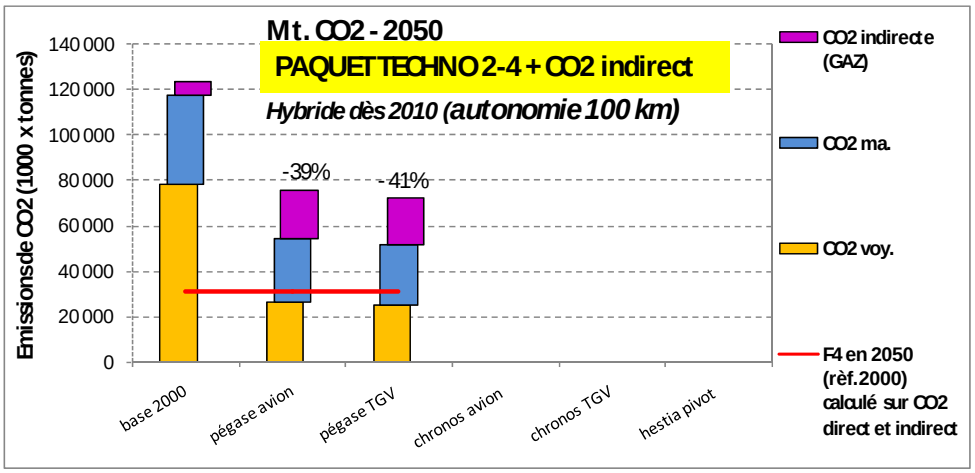
Figure 38 : Ensemble des émissions directes et indirectes de CO2 des transports dans Pégase, paquet technologique 2-4



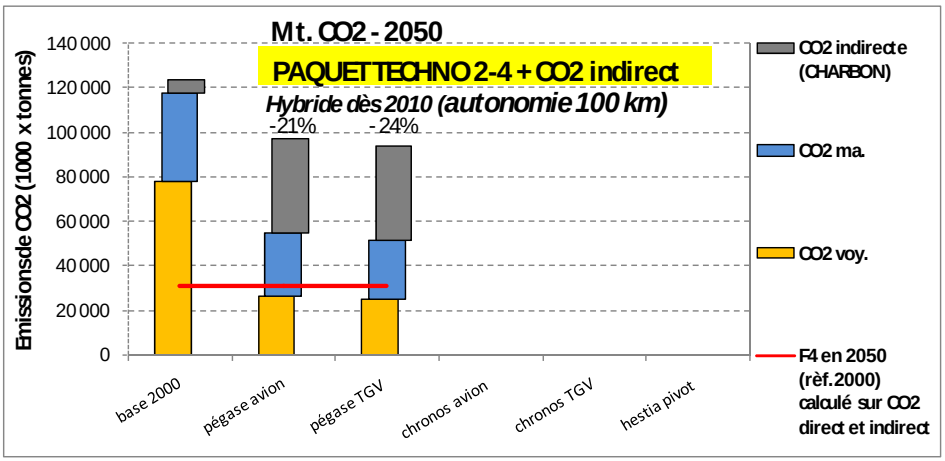
Avec une structure moyenne de production de l'électricité de réseau cohérente avec l'objectif facteur 4 (cf. travaux de la Commission de l'Energie 2007 sur le F4), la baisse des émissions directes et indirectes n'atteindrait plus, au mieux, que 50% (variante TGV couplée avec le paquet technologique 2.4)



Si l'électricité utilisée par les hybrides et les véhicules électriques devait être produite entièrement à partir de cycles combinés gaz performants, la réduction d'émissions directes et indirectes n'atteindrait au mieux que 41%



Si, enfin, cette électricité devait âtre produite à partir de centrales conventionnelles à charbon, la baisse des émissions globales pourrait être limitée à 24%, soit moins que dans le cas d'un recours au paquet 2-1.

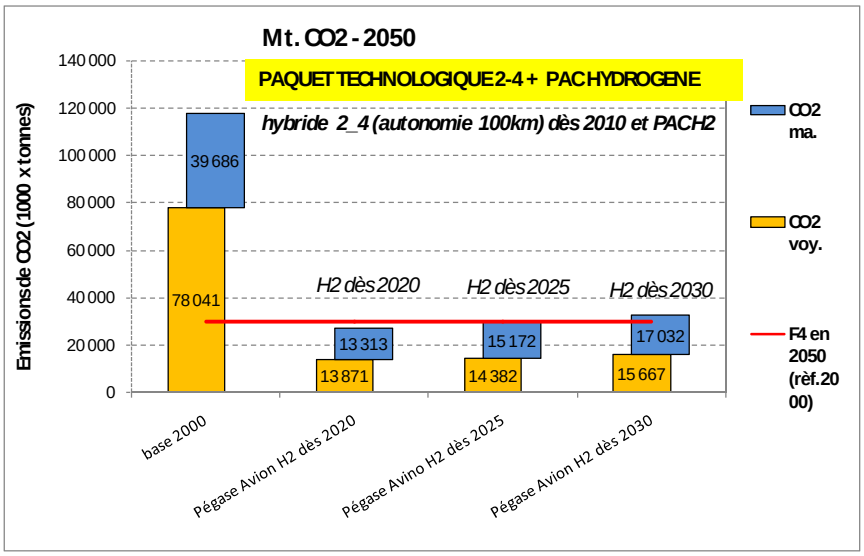


Comment atteindre le facteur 4 dans Pégase ?

Quelle rupture technologique de grande ampleur, telle la généralisation des véhicules à pile à combustibles alimentés à l'hydrogène de réseau neutre au regard du CO2, permettrait d'atteindre le facteur 4 dans les deux variantes du scénario tendanciel ? Si une telle rupture devait se produire, sous quel délai devrait-elle se produire de manière à assurer l'atteinte du facteur 4 en 2050 ?

On peut mesurer l'effort technologique additionnel nécessaire pour atteindre le facteur 4 dans le cas de la variante AVION de Pégase, la plus émettrice de CO2-énergie. Le graphique ci-dessous indique à partir de quel moment ces véhicules à PAC, alimentés par de l'hydrogène de réseau neutre sur le plan du CO2, doivent être mis sur le marché pour atteindre le facteur 4 en 2050 sur les émissions directes du transport.

Figure 39 : Comment atteindre le facteur 4 pour les transports dans Pégase ?



L'atteinte du facteur 4 en 2050 pour la variante Avion de Pégase supposerait l'entrée en commercialisation des véhicules équipés de pile à combustible hydrogène dés 2020 et au plus tard 2025 (dans le cas de la variante Pégase TGV, les dates sont décalées de deux ans). Le début de la commercialisation des véhicules hydrogène entre 2020 et 2025 viendrait alors se cumuler aux efforts de réduction déjà obtenus par les véhicules hydrides rechargeables d'une autonomie de 100 km commercialisés dés 2010 nonobstant les progrès réalisés sur l'aérien (-35% par pkm avion) et l'introduction de biocarburant à hauteur de 35%. Autrement dit, pour atteindre le facteur 4, le développement et la commercialisation des véhicules à PAC hydrogène dès 2025 ne peut se faire qu'au détriment du développement des véhicules hybrides rechargeables avant 2025 auquel cas, les gains réalisés d'un côté seront perdus de l'autre.

On résume ci-dessous les principaux enseignements tirés des scénarios Pégase.

> **Pégase, vision tendancielle de la mobilité, ne réunit pas les conditions d'une mobilité soutenable (congestion, accidents, nuisances sonores, etc.). En outre, Pégase ne permet pas d'atteindre le facteur 4 sauf à faire l'hypothèse du développement massif d'une économie hydrogène à l'horizon 2050, hydrogène produit sans émission de CO2.**

> **En admettant une limite raisonnable dans le développement des technologies d'ici 2050, Pégase permettrait une réduction par 2 des émissions de CO2 pour le transport des passagers et 1,4 pour les marchandises.**

> **On peut en déduire que la moitié de l'effort pour arriver au facteur 4 relève de la maîtrise de la demande et de l'optimisation du système de transport, lesquelles ne peuvent aller que dans le sens d'une amélioration de la soutenabilité.**

4.1.5.2 Quelles politiques publiques dans Pégase ?

Le défi majeur des politiques publiques dans les scénarios Pégase est celui de la technologie. Il s'articule autour de trois idées-force :

- Soutenir la R&D sur : les motorisations, les conceptions des véhicules et des moyens de transport, les carburants alternatifs (biocarburants, hydrogène,…), l'intermodalité, l'automatisation de la conduite sur route ;
- Inciter les industriels et les sociétés de service-transport à mettre au point et à commercialiser les solutions techniques innovantes émergeant de la R&D : dispositifs réglementaires, labellisation, subventions,…
- Inciter les consommateurs et les sociétés de transport à acquérir les solutions technologiques innovantes proposées par les constructeurs : bonus/malus, autorisations de circulation,…

L'autre défi des politiques publiques dans ces scénarios Pégase est celui du confinement du développement du transport aérien. Il implique un vigoureux effort dans le déploiement des infrastructures terrestres de déplacement rapide, TGV en particulier.

Le tableau ci-dessous synthétise l'expression des politiques publiques dans les scénarios Pégase, selon les conventions adoptées dans la méthode d'évaluation des politiques publiques présentée plus haut : mesures intégrées au programme d'actions, intensité de mise en œuvre.

Tableau 15 : Mesures phares des politiques publiques dans les scénarios Pégase

INTENSITE	PEGASE	PEGASE TGV
Prix et taxes		
Taxe CO2	1	2
Subventions au transport multi-modal	0	1
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	3	3
Réduction des taxes et subventions sur les ENR	3	3
Subventions au véhicule electrique	3	3
Subventions au véhicule urbain	3	3
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	3	3
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	3	3
Bonus/malus en fonction des taux d'émission	3	3
Péage sur les autoroutes	1	1
Réglementation		
Normes CO2 pour les VP	3	3
Investissements, aménagement		
Extension des infrastructures TGV	0	2
Meilleur service et logistique pour le rail fret	0	2
Centre-villes sans voiture	1	1
Extension des zones urbaines limitées à 30km/h	1	1
Autres		
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	3	3
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	3	3

4.1.5.3 Qui perd, qui gagne dans les scénarios Pégase ?

Les politiques publiques menées dans le scénario Pégase vont faire porter l'essentiel de l'effort sur les constructeurs automobiles, accessoirement sur les filières industrielles impliquées dans la construction des TGV.

En imposant un rythme à la baisse des émissions unitaires de CO2 des véhicules routiers, ces mesures vont contraindre les constructeurs à un effort d'innovation considérable, dont les effets seront de deux types opposés :

- d'un côté, il faut s'attendre à des hausses significatives des coûts de production des véhicules, et donc des prix de vente, dont les conséquences sur les conditions de concurrence entre constructeurs dépendront étroitement de leurs positionnements en structure de gamme ;
- en revanche, le processus d'innovation devrait conférer un avantage comparatif à long terme à l'ensemble de ces constructeurs, sur les marchés émergents notamment, du fait de la globalité des contraintes provenant des ressources pétrolières et du changement climatique.

Le tableau ci-dessous donne une vision quantifiée des impacts relatifs des mesures de politiques publiques sur les grands acteurs industriels, selon les conventions exposées plus haut. On notera l'existence d'un risque que les exigences technologiques n'affectent globalement négativement l'activité de l'ensemble de ces acteurs (hors effet indirect via la maîtrise technologique sur les marchés internationaux).

Tableau 16 : Qui perd, qui gagne, dans Pégase

MESURES	Fabricants automobiles et sous-1traitants	Fabricants d'équipement électriques et électroniques	Producteurs de biens intermédiaires pour le transport	Autres fabricants fournisseurs des transports	Companies ferroviaires	Transporteurs routiers	Companies de transports publics urbains	Companies d'autocars	Autres producteurs de services de transport	Garagistes	Compagnies de télécommunication	Compagnies offrant d'autres services au transport	Raffineurs et distributeurs pétroliers	Compagnies électriques	Compagnies gazières	Agriculteurs	**Ensemble**
Prix et taxes																	
Taxe CO2 (TGAP)	-274	25	0	18	174	-179	29	-118	-46	-62	5	-5	-353	23	-17	42	**-736**
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	58	-11	3	-5	-32	135	-105	-65	-16	22	0	-3	22	-5	27	0	**23**
Réduction des taxes et subventions sur les ENR	0	-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-29	-4	-4	108	**61**
Subventions au véhicule electrique	0	211	0	-3	-11	0	-54	-11	0	11	0	-3	-94	58	0	0	**104**
Subventions au véhicule urbain	108	-5	3	-3	-22	0	-35	-22	-8	22	0	0	11	-3	0	0	**46**
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	-18	162	-9	-23	-84	240	0	54	-32	0	0	-18	-228	24	15	0	**84**
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	-126	162	-9	-23	-84	45	-90	36	-18	36	0	-18	-264	20	15	0	**-318**
Bonus/malus en fonction des taux d'émission	-180	48	-5	0	18	0	14	18	14	-18	0	-5	-228	20	15	0	**-290**
Péage sur les autoroutes	-92	18	0	9	76	-130	-5	-104	29	-38	5	5	-50	3	2	0	**-273**
Réglementation																	
Normes CO2 pour les VP	-749	187	-7	46	125	-72	158	125	72	-211	0	7	-326	82	-17	48	**-533**
Investissements, aménagement																	
Centre-villes sans voiture	-6	12	0	2	6	0	26	6	-5	-18	7	8	-6	3	0	0	**34**
Extension des zones urbaines limitées à 30km/h	-6	9	0	0	0	0	11	0	-5	-12	7	7	-6	2	0	0	**6**
Autres																	
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	0	11	0	5	22	0	54	22	0	-22	0	5	-36	8	3	36	**108**
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	-276	45	-9	0	36	0	59	36	14	-72	20	11	-300	20	15	0	**-404**
Ensemble du programme	**-1562**	**863**	**-33**	**24**	**223**	**40**	**61**	**-22**	**-2**	**-362**	**42**	**-9**	**-1887**	**249**	**54**	**234**	**-2088**

4.1.5.4 Comment évoluent les prix et les coûts du transport dans les scénarios Pégase ?

L'effet majeur des mesures de politique publique dans Pégase est de renchérir substantiellement le prix de vente des véhicules routiers, dans un contexte où l'inévitable taxation du carbone et le possible renchérissement des hydrocarbures (que le respect du facteur 4 dans l'ensemble des pays industriels devrait toutefois modérer) feront également monter fortement le prix du litre d'essence ou de gazole à la pompe.
Bien sûr, la forte diminution des consommations unitaires de produits pétroliers des véhicules routiers résultant des progrès technologiques et des substitutions vers les biocarburants et l'électricité, viendra contrebalancer tout ou partie (voire plus) de l'augmentation du prix des carburants pétroliers.
On peut valablement considérer que le surcoût des véhicules dû aux évolutions technologiques sera, pour les consommateurs finals, globalement compensé par les économies sur les carburants, faute de quoi il n'y aurait pas de marché pour ces véhicules. Pour autant, il

n'en reste pas moins que l'ensemble du coût (acquisition + fonctionnement) devrait être appelé à croître, mais vraisemblablement à un rythme maximum similaire à celui de la croissance des revenus (maintien du coefficient budgétaire).

Le tableau ci-dessous donne une vision quantifiée des impacts relatifs des mesures de politiques publiques sur les grands postes de coût des transports, selon les conventions exposées plus haut. On notera l'existence d'une certaine probabilité que les exigences technologiques ne pèsent globalement à la baisse sur les coûts de transport (hors croissance du prix des produits pétroliers et carburants de substitution).

Tableau 17 : Quelles évolutions des coûts de transport dans Pégase

MESURES	Prix d'achat des voitures	Prix d'achat des VUL	Coût d'usage de la voiture	Coût d'usage du VUL	Prix du billet de train	Prix du billet de transp. public	Prix du billet d'autocar	Prix du billet d'avion	Prix du transport routier de fret	Prix du transport de fret par rail	Prix du transport de fret par VE	**Ensemble**
Prix et taxes												
Taxe CO2 (TGAP)	14	21	210	168	14	56	56	84	140	21	28	812
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	0	0	-135	-108	0	-18	-18	0	-90	0	0	-369
Subventions au véhicule electrique	-36	-54	-90	-72	0	18	0	0	0	0	0	-234
Subventions au véhicule urbain	-36	-27	-45	-36	0	18	0	0	0	0	0	-126
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	0	0	0	0	0	-60	-60	0	-150	0	0	-270
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	-60	-90	-150	-120	0	0	0	0	0	0	0	-420
Vignettes variables en fonction des taux d'émission	30	45	-75	-60	0	0	0	0	0	0	0	-60
Péage sur les autoroutes	0	0	100	80	0	0	20	0	50	0	0	250
Réglementation												
Normes CO2 pour les VP	144	216	-720	-576	0	0	0	0	0	0	0	-936
Autres												
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	0	0	-105	-84	0	-42	-42	0	-105	0	0	-378
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	0	0	0	0	0	-18	0	0	0	0	0	-18
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	90	135	-450	-360	0	0	0	0	0	0	0	-585
Ensemble du programme	146	246	-1460	-1168	14	-46	-44	84	-155	21	28	-2334

4.1.5.5 Synthèse de l'évaluation des politiques publiques au regard de la mobilité durable dans les scénarios Pégase

Le tableau ci-dessous résume les impacts que l'on peut attendre des politiques publiques dans les scénarios Pégase, selon les grands critères retenus dans cette procédure d'évaluation multicritères (cf. méthode exposée plus haut). On rappelle que les chiffres rassemblés dans ce tableau n'ont pas de valeur intrinsèque, mais indiquent la direction et la force relative des impacts selon les critères retenus.

Tableau 18 : Synthèse des impacts des politiques publiques dans Pégase

Impacts	PEGASE	PEGASE TGV
Acteurs	-2088	-2488
Prix/coûts	-2334	-1462
Objectifs TEV	6534	4241
technologie	6576	3744
demande	-42	497

4.2 Chronos : quand le temps devient la ressource la plus rare…

Chronos : Lorsque le temps, comme le dieu Kronos, dévore ses enfants

Père de Zeus, fils de l'union du ciel et de la terre, comme les Titans dont il fait partie, le dieu Kronos (ou Cronos) évoque la violence et la vengeance. Il en a été la victime quand il a dû combattre son père. Il en a été aussi l'auteur en dévorant systématiquement ses enfants, jusqu'à ce que Zeus réussisse à mettre fin à ce cycle de violence en redonnant vie aux autres enfants de Kronos, notamment à sa sœur Hestia (voir ci-dessous). Une fois rompu le cycle de la violence, Kronos, appelé parfois le « dieu courbe », celui de l'éternel retour des choses, est aussi évoqué dans une perspective apaisée d'un monde de paix stable et durable. C'est sur cette base qu'Aristote se permet un jeu de mot suggestif en associant Kronos et Chronos, le temps. Le temps qui nous dévore progressivement mais qui est aussi la condition même de la vie. La question clé devient alors celle de la maîtrise du temps, ressource précieuse mais rare qu'il faut apprendre à gérer. L'accroissement de la vitesse de nos déplacements est une forme de gestion de cette rareté, mais elle n'est pas la seule. De même que Kronos s'est, dans certaines versions de la mythologie, réconcilié avec ses enfants, de même peut-on imaginer d'apprivoiser Chronos, le temps qui passe

4.2.1. Les fils directeurs des scénarios de la famille Chronos

4.2.1.1 Rappel des contraintes, variables et indicateurs de mobilité : scénarios Chronos

Contraintes et tendances structurelles →	**Variables** →	**Indicateurs de mobilité**
- **Les tendances démo-économiques** Croissance économique Vieillissement Hausse des prix du pétrole - **L'organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation Hausse du coût relatif du transport qui accroît la massification des flux Offre fret sans grands changements Succès confirmé des hypermarchés	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les modes de vie** Hausse des BTT Coefficients budgétaires en hausse pour les dépenses de mobilité Localisation des ménages inchangée mais rationalisation des programmes d'activités. - **Les politiques publiques** Contraintes accrues sur la vitesse et les usages de la route Développement des péages Taxes carbones Marchés de permis négociables Aides à la recherche Investissements en infrastructures TGV	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

Scénario Chronos : maîtrise et tarification de la vitesse

Atteinte du facteur 4 par une action de type réglementaire sur les vitesses routières conjuguée à un accroissement du coût de la mobilité en fonction de la vitesse et des émissions CO2.

> Contexte et sentier technologique raisonnable identiques au scénario de référence

> Hypothèses structurantes
- Découplage de la croissance du PIB et des vitesses de déplacement.
- Les vitesses moyennes sur route diminuent de 20%
- Le ralentissement des vitesses entraîne une hausse du BTT de 20% liée à la rigidité des localisations des logements et des activités économiques.
- Les tonnes.km transportées ne sont pas affectées par la constance de la vitesse moyenne.

4.2.1.2 Passagers: La congestion routière et le développement des modes à grande vitesse poussent à une dérive des budgets temps de transport

Le message des scénarios Pégase est que, quoi que l'on fasse, vouloir atteindre un facteur 4 devra se traduire par une diminution des Vkm ou par un report modal plus favorable à l'environnement. Le besoin en matière de réduction de Vkm et/ou de report modal sera plus ou moins fort selon le degré d'avancement technologique et de la capacité de ces nouvelles technologies à pénétrer le marché.

Chronos, prolongement de Pégase, va dans le sens d'une explosion de la mobilité de plus en plus coûteuse en temps du fait d'une triple substitution : les modes rapides se substituent aux modes lents (avec effet rebond sur les distances et le temps), les TC se substituent à la VP (d'où hausse du BTT) et la VP passager (covoiturage) à la VP conducteur (hausse du BTT).

Les politiques visent à peser sur ces évolutions par une maîtrise forte des vitesses de déplacement, combinant la réglementation de la vitesse sur le réseau routier avec des actions sur les prix.

Déplacements urbains et régionaux

Les conséquences principales que l'on peut attendre d'une maîtrise des vitesses combinée à une action publique par les prix sur les déplacements urbains et régionaux des personnes sont les suivantes :
- les budgets-temps de transport (btt) augmentent essentiellement dans les déplacements urbains et régionaux du fait de l'inertie des localisations (habitats, logements, aménités) et de l'aversion au changement.
- le ralentissement du trafic routier entraîne des reports sur les transports collectifs dont l'offre s'ajuste mais également au prix d'un ralentissement.
- les voies routières rapides subsistent mais à un coût d'accès élevé ou pour le covoiturage.
- les gens acceptent de passer plus de temps dans les transports car l'utilité du temps passé dans le transport augmente.

Déplacements longue distance (>150 km)

Pour les déplacements de longue distance, les principales conséquences que l'on peut attendre sont les suivantes :
- peu d'influence sur le BTT longue distance.
- l'offre de TGV et la tarification du transport aérien induisent un double report de la voiture vers le TGV, de l'avion vers le TGV (en particulier dans Chronos TGV).
- la limitation et la tarification de la vitesse sur autoroute pour les véhicules émetteurs de CO2 entrainent un report du trafic routier sur le transport ferroviaire, surtout TGV

Il y a toutefois une incertitude forte sur le degré de croissance du trafic aérien dans l a famille de scénarios Chronos, qui a conduit à distinguer deux variantes:
- une variante « **Aérien** » dans laquelle l'avion reste sanctuarisé et la croissance du trafic aérien forte malgré des prix élevés (+ 55% par rapport à 2000).
- une variante « **TGV** » dans laquelle l'ampleur et la rapidité du développement du trafic ferroviaire à grande vitesse conduit à un recentrage de l'avion sur la très longue distance, soit les destinations extra- européennes (- 39 % par rapport à 2000) .

4.2.1.3 *Les marchandises : le stimulus des prix et le ralentissement de la route poussent à modifier l'approche logistique*

L'idée d'agir sur les prix nous amène à concevoir le développement du système de transport comme semblable à celui d'un territoire où des améliorations (ou des dégradations) de la fluidité du réseau sont introduites par la construction (ou la disparition) d'une infrastructure de transport.

L'apparition (ou disparition) d'une infrastructure de transport amène des gains (ou des pertes) de temps et des effets sur les prix du transport. Ces gains/pertes de temps seront intégrés par les acteurs (chargeurs logisticiens et transporteurs) tout en minimisant leurs coûts et en maximisant leurs profits.

Ces jeux de minimisation de coûts et maximisation des profits suite à un changement dans les vitesses du réseau -donc des coûts de transport- peuvent donner lieu à[24] :

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

- une intégration des changements par le système en augmentant le temps de transport des marchandises (notamment si les nouvelles infrastructures ne suivent pas le rythme des besoins). Ce qui implique une élasticité vitesse/PIB égale à 0 (voir famille des scénarios Chronos). Cette intégration peut donner lieu à des changements au niveau des modes si, dans le système, il est décidé d'inciter un mode plus que les autres à développer un service plus rapide et/ou efficace.

Ou

- par une augmentation de la disposition à payer (transport par avion par exemple), ce qui entraînera une augmentation des prix à la consommation (voir famille des scénarios Chronos).

[24] C'est le niveau du prix de transport qui déterminera quelle option se produira

On s'intéresse ici aux effets d'un durcissement relatif sur les prix du transport de marchandises (notamment routier, cf. les projets de péage en France…) et sur les vitesses. Les tendances peuvent aller vers des contre-tendances avec par exemple le développement des VUL (plus propres ? mais faisant au total plus de véhicules-kilomètres) et aussi la poursuite de la massification, de la standardisation etc. On peut aussi imaginer une augmentation du poids maximum des camions, le développement d'axes réservés aux poids lourds.

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 comme celle qui a été évoquée plus haut : en cas de changement dans le coût de transport, soit on augmente le Temps de Transport (TT) soit on diminue les distances. Dans la logique des scénarios Chronos, on accepte une compensation par le TT.

A l'intérieur de ce scénario nous allons nous intéresser à l'évolution des parts modales qui nous semblera 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 sur les vitesses de chaque mode pour chaque service de mobilité.

Un basculement recherché sur le rail

L'enjeu dans Chronos c'est un arbitrage entre le besoin en vitesse (qui augmente) et les contraintes publiques sur la vitesse (qui doit globalement rester constante) conduisant à utiliser des modes de transport plus propres et à améliorer ainsi l'empreinte CO2 de l'ensemble du transport de marchandises.

L'objectif est donc de faire passer un certain nombre de tonnes sur le rail tout en maintenant une vitesse globale de déplacement des marchandises constante, ce qui conduit à une croissance accélérée du rail tandis que la vitesse sur la route stagne quasiment.

Un basculement nécessaire sur du rail rapide

Les tonnes en excédent qui basculent sur le rail ne sont compatibles avec la faible vitesse moyenne du rail conventionnel que si une partie croissante bascule sur du rail rapide ce qui impose que celui-ci propose un meilleur service du point de vue du coût global du transport.

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

Des enjeux forts pour les politiques d'offre

L'enjeu dans la famille Chronos est de jouer sur l'offre du rail –qui devrait être de plus en plus attrayante- avec des chaînes logistiques intégrées et peu de ruptures de charges à fin de contrer l'attractivité de l'avion.

De même, l'arbitrage entre le maritime et le transport aérien jouera de façon spectaculaire sur l'utilisation du rail. D'où l'importance des chaînes logistiques intégrées (qui sont déjà en train de se développer assez fortement, par exemple VEOLIA cargo et son partenariat avec la SNCM).

Une augmentation du prix réel du transport routier

Chronos est un scénario où la vitesse est pénalisé. De ce fait nous pourrions observer, comme il l'a été fait en Angleterre, une augmentation du taux moyen de remplissage des véhicules et/ou un report modal sur des modes moins chères. Cet effet aura une influence positive sur la réduction d'émissions.

Des améliorations dans les routes du fret routier.

L'efficacité des routes est un des facteurs les plus importants du scénario Chronos. La densification du réseau et la progression de l'accessibilité permettraient de réduire la distance moyenne d'un parcours. Cette meilleure accessibilité des villes pourrait se traduire en une réduction des Tkm et donc des émissions de CO2. Toutefois, une accessibilité accrue pourrait signifier une fluidité accrue dans le réseau pouvant entrainer une ré-augmentation des distances parcoures pour transporter les marchandises.

Un autre moyen d'améliorer les itinéraires pourrait provenir de l'utilisation des nouvelles technologies qui pourraient réduire les tonnes-km de 5 à 10% (selon les calculs du DOT anglais, dans McKinnon 2006). L'importance des réductions seraient déterminées par la nature de l'opération de transport et le niveau des améliorations que pourrait représenter l'utilisation des nouvelles technologies en comparaison du système actuel (Department for Transport, 2005 dans McKinnon 2006).

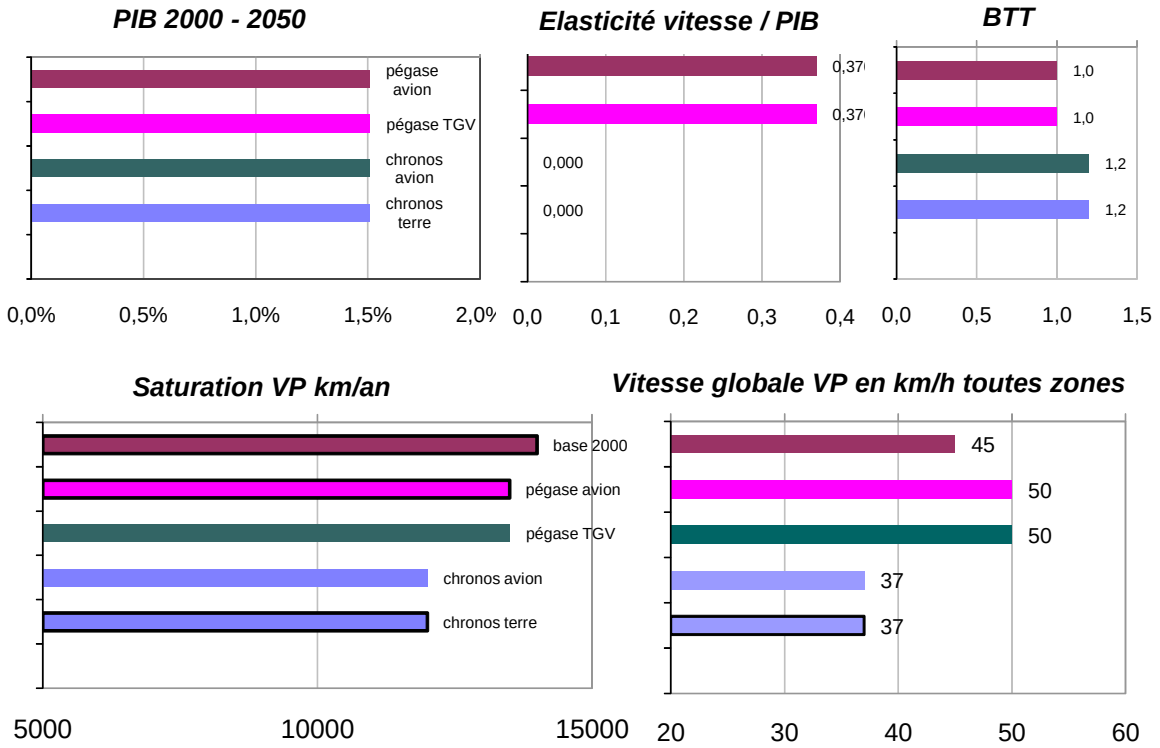
4.2.2. Les trafics de passagers et les émissions de CO2 dans Chronos

4.2.2.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Chronos

Dans les deux variantes du scénario Chronos, des hypothèses sont faites sur les paramètres fondamentaux. La croissance du PIB et le niveau de population restent quant à eux identiques à ceux retenus dans Pégase.

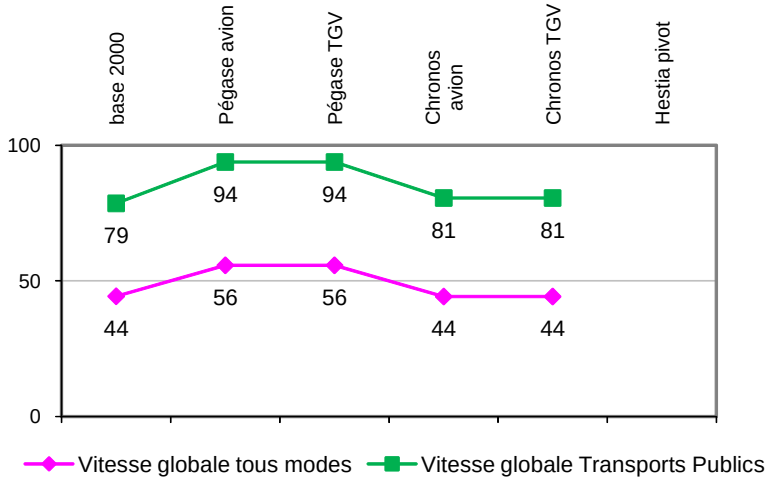
- l'élasticité de la vitesse au PIB est calée sur 0 contre 0.37 pour les scénarios Pégase.
- le budget temps augmente de 20% de 2000 à 2050 suite au ralentissement des vitesses et à l'inertie des localisations.
- le kilométrage annuel moyen des VP passe de 14 000 km à 12 000 km entre 2000 et 2050, soit une baisse de 13% par rapport à Pégase en 2050.

Compte-tenu de ces hypothèses, la vitesse moyenne de déplacement des personnes reste aux alentours de 44 km/h de 2000[25] à 2050. Par hypothèse, et pour rester en conformité avec l'esprit du scénario, la vitesse moyenne des VP sur l'ensemble des zones doit baisser de 6km/h, et passe ainsi de 43km/h en 2000 à 37 km/h en 2050 (baisse de 14%).
En conséquence, compte-tenu de la circulation et de la vitesse moyennes des VP, TILT calcule que la vitesse moyenne des transports collectifs doit passer de 79km/h en 2000 à 81 km/h en 2050 pour assurer la stabilité de la vitesse moyenne des déplacements.



[25] La vitesse moyenne 2000 résulte du rapport entre le trafic global observé et le volume d'heures de déplacement pour un budget temps moyen d'une heure par jour et par personne ; elle correspond à des vitesses conventionnelles par mode cohérentes avec la vitesse moyenne globale et les parts modales.

Vitesse globale TP et Tous modes en Km/h toutes zones



Une fois les trafics et les vitesses moyennes globales par mode obtenues comme indiqué ci-dessus (modes doux, VP et transports collectifs), TILT est ensuite utilisé pour mettre en cohérence d'un côté les hypothèses retenues sur les mobilités par service urbain et régional et de l'autre, la part de la VP dans ces services et les vitesses par mode et par service.

La progression de la mobilité individuelle en urbain et régional est prise par hypothèse identique à celle du scénario Pégase, puisque l'on considère dans Chronos que les passagers compensent la perte de vitesse par la hausse des budgets-temps.

Par construction du scénario Chronos, la combinaison « part de la VP par service, vitesses des modes par service » que nous avons privilégiée est celle la plus en cohérence avec la baisse de la vitesse moyenne de la voiture, tous services confondus. Elle se décline comme suit.

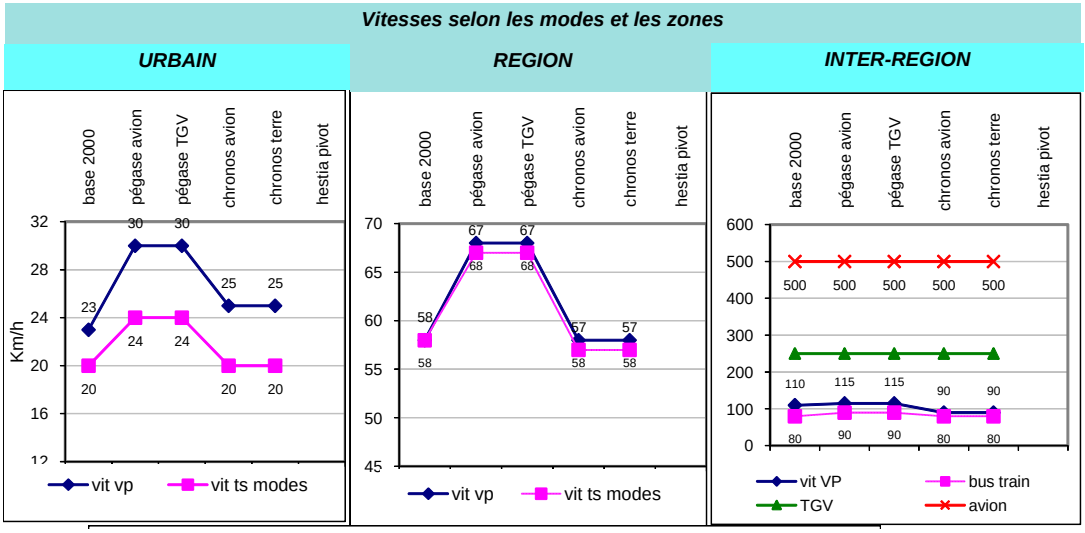
- en urbain, la part de la voiture dans la mobilité décroit de 90% (2000) à 80% (2050), soit un peu moins que dans Pégase, tandis que sa vitesse ne progresse que légèrement (10 %, soit 2km/h), passant de 23 à 25 km/h entre 2000 et 2050, celle de l'ensemble des modes (modes collectifs, compris modes individuels et modes doux) restant stable à 20 km/h jusqu'en en 2050.

- en région, comme dans Pégase, la part de la voiture dans la mobilité croit de 83% (2000) à 85% (2050), mais en revanche sa vitesse baisse légèrement (1km/h), en passant de 58km/h en 2000 à 57 km/h en 2050, de même que celle de l'ensemble des modes.

En longue distance, on suppose que les vitesses par mode restent stables par rapport à l'année de base pour les modes rapides : 500 km/h pour l'avion, 250 km/h pour le TGV .Pour les bus et trains conventionnels, on considère une vitesse plus faible que dans Pégase, soit 80km/h. En conséquence, pour assurer l'équilibre des trafics et des vitesses par mode en 2050, à la fois globalement et pour les services urbains et régional, TILT indique que la vitesse des voitures sur longue distance doit nécessairement baisser de 20%, et passer de 110 km/h (2000) à 90km/h (2050), tandis que sa part dans les déplacements longue distance baisserait à 15%.

Les graphiques ci-dessous récapitulent l'évolution des vitesses par mode et par service de mobilité entre 2000 et 2050, vitesses identiques dans les deux variantes Chronos.

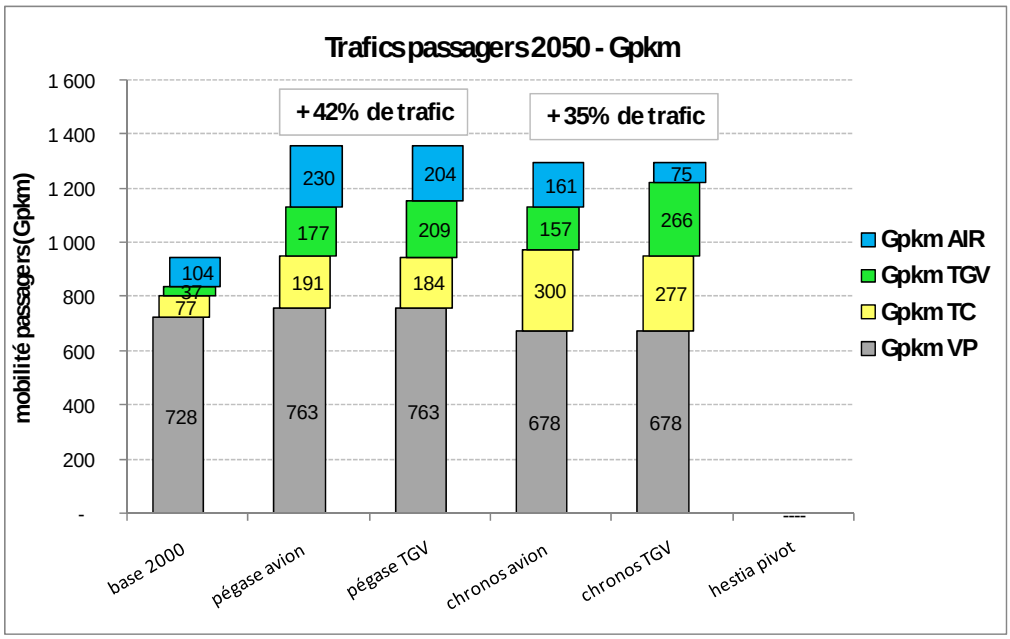
Figure 40 : Les vitesses des passagers dans Chronos



4.2.2.2 Les projections de trafics dans les scénarios Chronos

Le scénario Chronos, dans ses deux variantes, correspond à une hausse de trafic global passager de 35% par rapport à l'année de base (2000). Par conséquent, le scénario Chronos n'est pas un scénario de restriction ou de rationnement de la mobilité mais plutôt un scénario de moindre hausse du trafic par rapport à une vision tendancielle.

Figure 41 : Les trafics de passagers dans Chronos

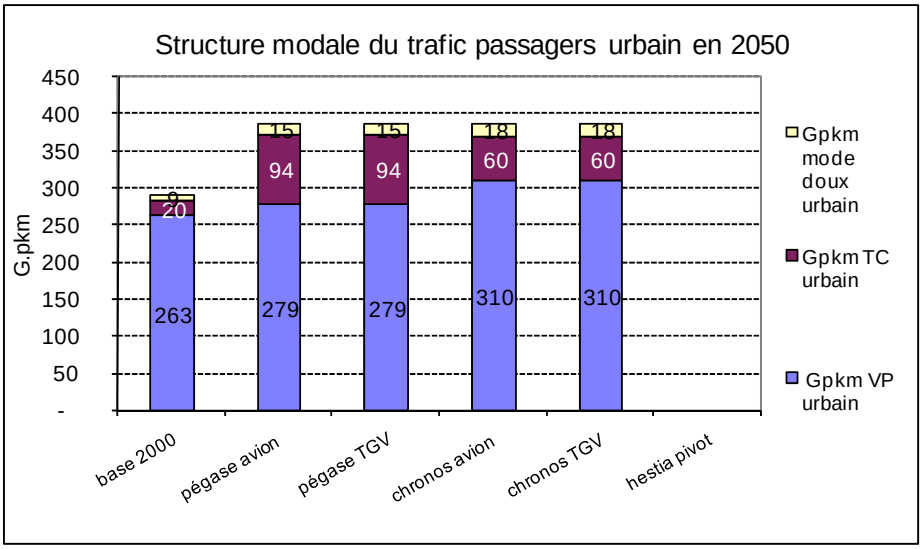


Les scénarios Chronos conduisent à des différences de trois ordres par rapport à Pégase et à l'année de base :

- une régression du trafic VP de 7% par rapport à l'année de base (alors que les variantes Pégase introduisent des hausses de 5%).
- une très forte croissance des modes collectifs urbains et régionaux + 290% dans la Chronos avion par rapport à l'année de base (contre 190% dans Pégase) comme compensation des baisses de trafic VP.
- dans la variante Avion, le trafic aérien augmente de 60% par rapport à l'année de base (contre 121% dans la variante Pégase avion).

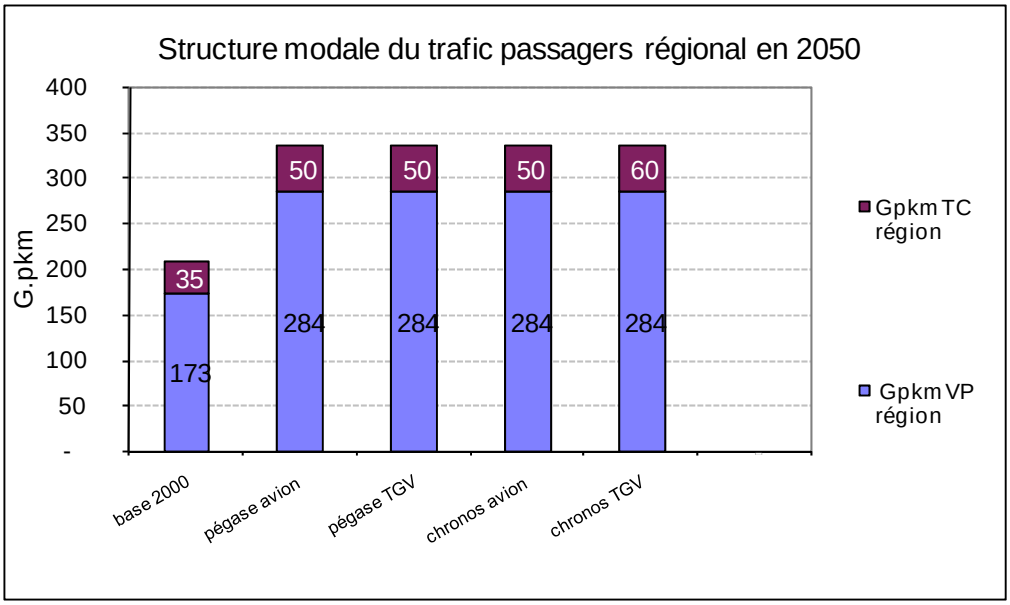
Les graphiques ci-après donnent des éléments de détails sur l'évolution des différentes parts modales selon les services de mobilité. On notera une très forte baisse de la voiture sur longue distance 30% de son niveau actuel en 2050 (contre 71% dans les variantes Pégase). Ce recul s'explique en grande partie par la baisse de la vitesse VP sur autoroute et l'évincement produit par les modes collectifs sur longue distance (qui offrent de meilleures possibilités de rentabiliser son temps). Or, ce recul de la VP sur longue distance produit des rééquilibrages en urbain et en région. En effet, dans la mesure où le kilométrage global par véhicule baisse relativement peu dans Chronos (12 000 km en 2050 contre 14 000 km en 2000), les trafics réalisés en VP sur longue distance se reportent sur les zones urbaines et régionales, zones dans lesquelles, la part modale de la VP se maintient à des niveaux élevés.

Figure 42 : La structure modale des trafics urbains de passagers dans Chronos



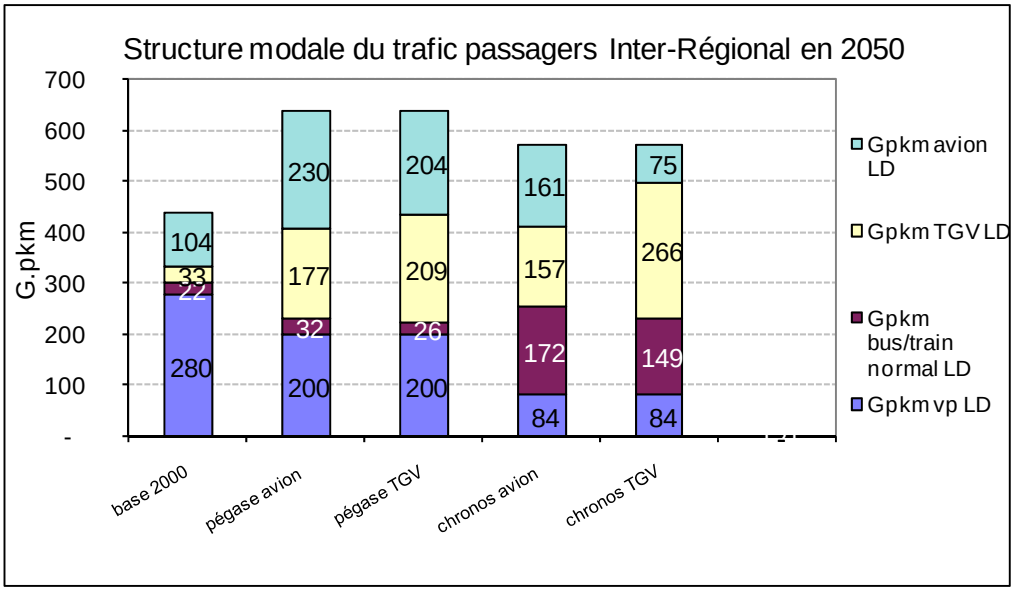
En urbain, le volume global de trafic reste identique par rapport à Pégase, soit une hausse de 37% au regard de l'année de base avec un partage modal moins favorable aux transports collectifs et une part modale de la voiture plus importante que pour Pégase 80% contre 72% mais moindre qu'en année de base (90%). On observe une configuration identique en région :

Figure 43 : La structure modale des trafics régionaux de passagers dans Chronos



Le trafic VP dans les deux variantes de Chronos est identique à celui de Pégase, soit une progression de 64% par rapport à l'année de base. La structure modale en région est identique à celle de Pégase.

Figure 44 : La structure modale des trafics longue distance de passagers dans Chronos



Sur les déplacements longue distance supérieurs à 150 km, les deux variantes Chronos correspondent à des progressions de trafic moindres que dans les variantes Pégase. Le contraste est ici important entre les deux variantes et par rapport au scénario Pégase.

Dans les deux variantes, on note le recul, déjà souligné, de la voiture en longue distance. Délaissée du fait de sa faible vitesse doublée du peu de possibilités offertes de rentabiliser son temps de transport, le trafic VP subsistant en longue distance bascule sur le

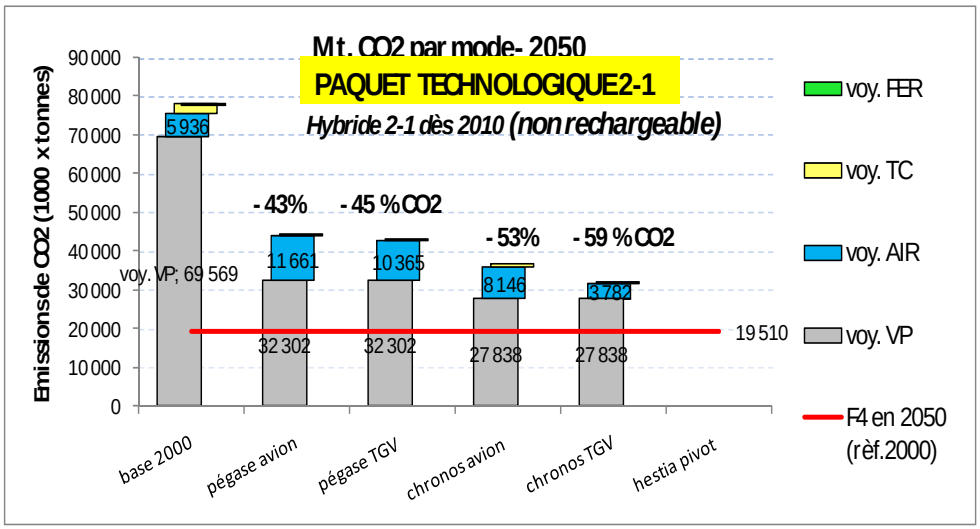
bus et les trains conventionnels dont la part modale passe ici à 30% (Chronos avion) contre 4% en année de base et 5% dans le scénario Pégase. La distinction entre les deux variantes s'opère essentiellement sur la part modale du TGV et de l'avion. La variante Chronos TGV parvient à une maitrise du trafic aérien alors que la variante Chronos avion correspond à une hausse de moindre mesure que celle envisagée dans Pégase.

4.2.2.3 Les projections d'émissions directes de CO2 dans les scénarios Chronos, transport de passagers

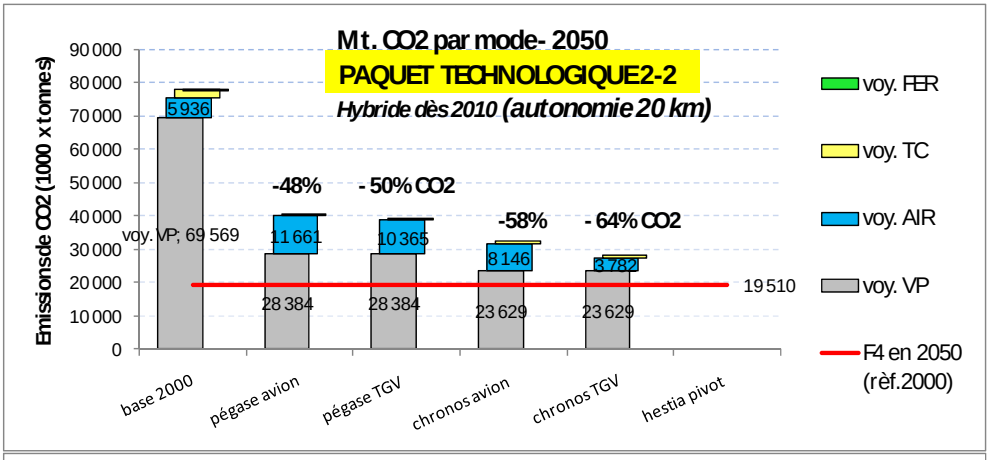
De la même manière que pour Pégase, les deux variantes de Chronos sont couplées aux quatre sous-paquets technologiques 2.1 à 2.4 préalablement définis.

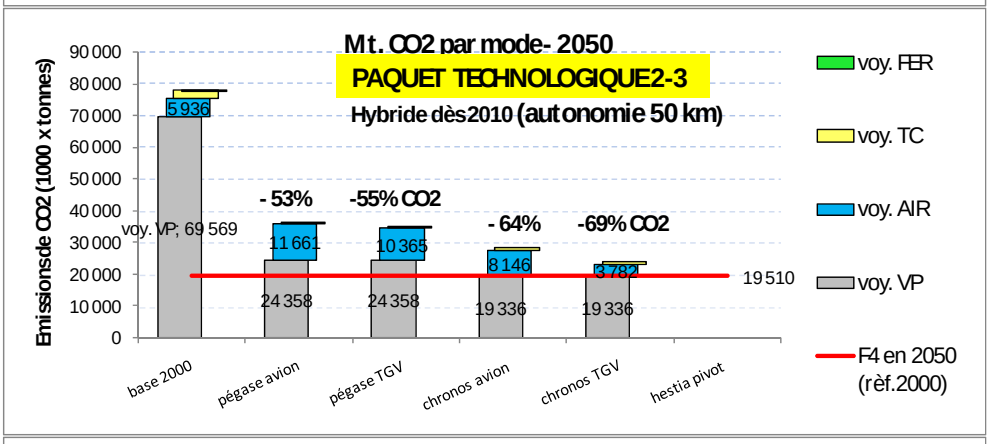
Le paquet 2-1 met en évidence une baisse des émissions de CO2 pour les passagers, baisse comprise entre 53% et 59% selon les variantes. La variante Avion est logiquement la plus éloignée de l'objectif facteur 4. En dépit de la moindre progression des trafics dans Chronos, cette baisse des émissions n'est toutefois pas suffisante pour atteindre le facteur 4 pour les trafics passagers. Rappelons que l'objectif facteur 4 correspond à une réduction de 75% des émissions.

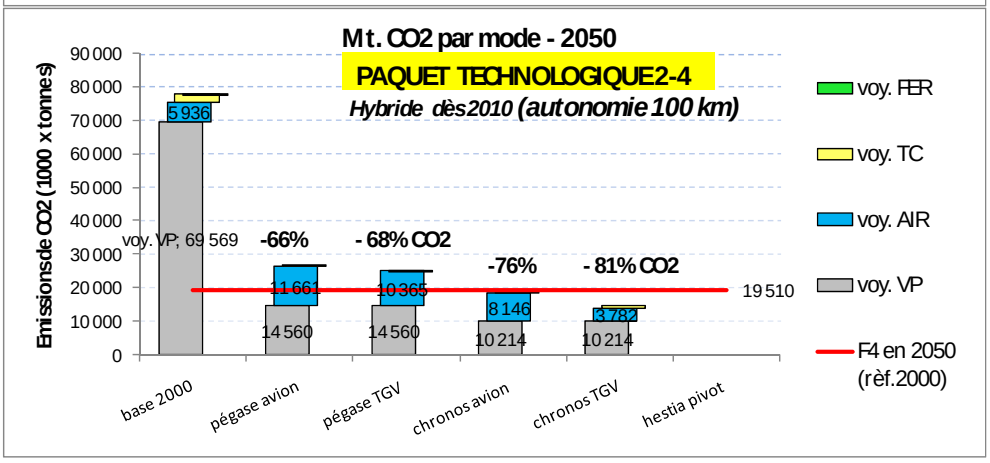
Figure 45 : Les émissions de CO2 du transport de passagers dans Chronos



L'utilisation des paquets technologiques, 2-2, 2-3, 2-4 couplés aux deux variantes de Chronos nous permet d'apprécier la sensibilité des émissions de CO2 à la croissance de l'autonomie dans les batteries des véhicules et les progrès réalisés au regard de la cible facteur 4.







Parmi toutes les configurations testées, aucune n'atteint le facteur 4 pour les émissions directes avec un développement des hybrides rechargeables dont l'autonomie serait inférieure à 50km.

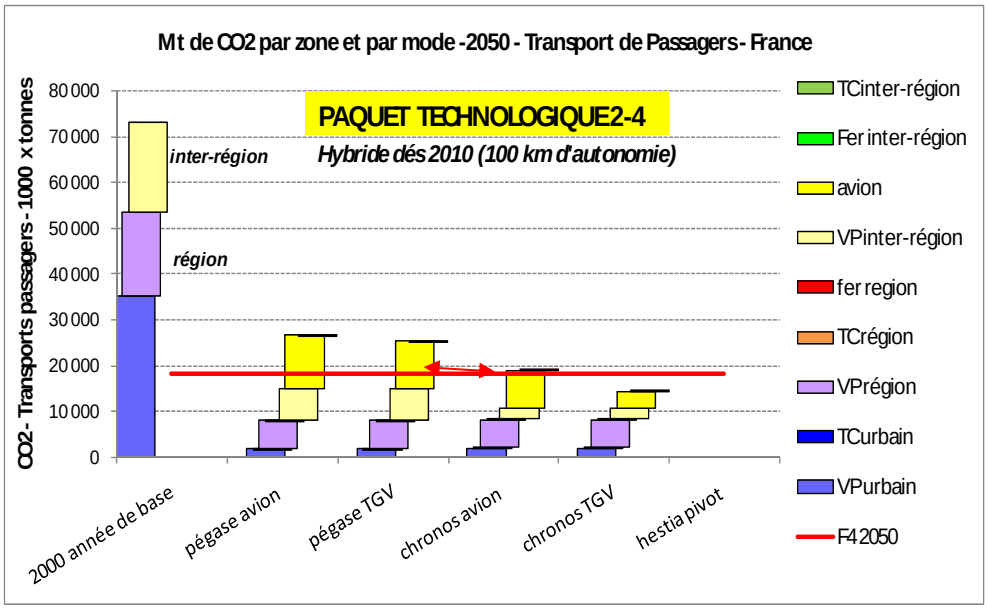
En revanche, le facteur 4 peut être atteint dans les deux variantes du scénario Chronos passagers sous condition d'un développement rapide des hybrides rechargeables avec une autonomie de 100 km. Le facteur 4 est tout juste atteint dans la variante Avion (-76% d'émissions) alors que la variante TGV conduit à une réduction de 81% supérieure à l'objectif.

Il ressort de cela qu'il est possible d'atteindre le facteur 4 pour les émissions directes à l'horizon 2050 dans la variante Chronos avion **pour les seuls trafics passagers tout en laissant une marge de progression de 60% pour le trafic aérien.** Atteindre l'objectif implique néanmoins de satisfaire les conditions suivantes :

- le développement massif des infrastructures ferroviaires à l'échelle européenne
- l'abandon de la voiture en longue distance au profit des modes collectifs.

Cette dernière condition est importante. Comme le montre le graphique ci-dessous, c'est essentiellement la compression des émissions de CO2 liées à la VP sur longue distance (hors autonomie de batterie) qui permet d'atteindre le facteur 4 par rapport à la variante Pégase TGV.

Figure 46 : Les émissions de CO2 du transport de passagers par catégorie de services dans Chronos



La question demeure de savoir si le facteur 4 peut être atteint globalement en intégrant les progressions de trafic des marchandises. La variante Chronos avion ne laisse en effet aucune marge de manœuvre pour les marchandises contrairement à la variante Chronos TGV qui laisse quelques degrés de liberté lié à une forte restriction de l'avion.

4.2.3. Les trafics de marchandises et les émissions de CO2 dans Chronos

4.2.3.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Chronos

La logique de Chronos instaure une augmentation du prix réel du transport routier qui pénalise la vitesse et les émissions. Dans la logique de TILT, cette hausse est semblable à la disparition où à la tarification d'une infrastructure. 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 produits, 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. Une logique d'intégration de chaînes logistiques s'instaure et commence à fonctionner pour réduire les émissions liées au transport routier en faisant participer d'autres modes de transport moins émissifs dans l'acheminement des tonnes produites ou consommées en France.

L'enjeu du scénario Chronos est d'arriver à contrôler le développement du transport routier, qui est à la fois rapide et très émissif, en le pénalisant à hauteur de la disposition à payer et en proposant un service plus performant sur le réseau ferroviaire. De cette manière, nous obtenons de résultats encourageants pour la longue distance tout en favorisant le transport routier là où les technologies pourraient proposer des avancées visant à réduire les émissions de manière efficace (dans le transport urbain ainsi que dans le régional).

Les élasticités à l'activité économique qui ont été utilisées pour Chronos sont les même que celles retenues dans Pégase. On considère ainsi que les contraintes imposées aux vitesses et l'accroissement du coût du transport ne sont pas suffisantes pour modifier les tendances de fond sur la logique de l'organisation spatiale de la production. Le développement des distances n'est pas remis en question dans cette famille de scénarios. Les marchandises continuent d'aller de plus en plus loin, mais on cherche à les reporter sur d'autres modes que la route.
Dans la famille de scénarios 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 à 43 km/h jusqu'en 2050[26] . 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 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 à environ 5%, de 50 km/h (2000) à 52 km/h en 2050, alors la vitesse moyenne du rail conventionnel et des modes rapides doit passer de 40 km/h (2000) à 45 km/h en 2050 pour conserver une vitesse moyenne de déplacement des marchandises constante. Cette évolution n'est envisageable qu'au prix d'un développement significatif des modes rapides (ferroviaire rapide et aérien, vitesse moyenne prise par convention égale à 200km/h), la vitesse du transport ferroviaire conventionnel étant considérée constante sur l'ensemble de la période. 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 et les besoins en matière de transport aérien de marchandises sont moindres que dans la famille de scénarios Pégase.

Le contrôle strict de la vitesse moyenne sur route suppose par ailleurs un renforcement du poids des services en urbain et régional dans le trafic routier (les vitesses y sont inférieures à la vitesse sur longue distance), et par contre-coup un poids du transport ferroviaire plus important sur la longue distance. Ceci suppose une amélioration relative des services du système ferroviaire par rapport à la route susceptible de renforcer l'attractivité de ce mode sur la longue distance.

[26] Les vitesses indiquées ici correspondent à des variations des vitesses conventionnelles considérées pour l'année de base et n'ont de signification que par rapport à ces vitesses conventionnelles de l'année de base

Tableau 19 : Hypothèses utilisées dans le scénario Chronos, trafic marchandises intérieur

	2000	2050
Vitesse route-Intérieur	50 km/h	52 km/h
Vitesse du rail-Intérieur	40 km/h	40 km/h
Vitesse du rail et modes rapides	40 km/h	45 km/h
Vitesse du l'ensemble du transport Intérieur	43 km/h	43 km/h
Elasticité vitesse/PIB		0
Elasticité T.Km/GDP intérieur		0,63 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur		1,6

Dans Chronos, nous envisageons donc un système basé sur des chaînes logistiques intégrées porte-à-porte, avec une large utilisation des ports et des trains. Pour la partie internationale de ce scénario, nous prenons en considération l'ouverture de nouvelles routes maritimes, avec des passages plus rapides qui permettent de saturer les besoins en vitesse et de les coupler à un système intérieur qui la pénalise mais qui développe fortement ces performances sur le rail et sur la navigation intérieure.

Tableau 20 : Hypothèses utilisées dans le scénario Chronos, trafic marchandises international

Vitesse route-International	52 Km/h
Vitesse du rail-International	40 Km/h
Vitesse du rail et modes rapide-International	70 Km/h
Vitesse du l'ensemble du transport International	52 Km/h
Elasticité vitesse/PIB-International	0,3
Elasticité TKm/Commerce extérieur	1,6

4.2.3.2 Les projections des trafics et des émissions de GES dans les scénarios Chronos

Comme le montre les graphes ci-dessous, une partie importante du trafic routier bascule sur le ferroviaire dans les scénarios 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 2025 il y a un début de report modal vers le ferroviaire conventionnel et les modes rapides. Ce report modal continue à se faire entre 2025 et 2050 et arrive à presque 50% du trafic total de marchandises.

Figure 47 : Trafic Marchandises 2025 dans Chronos

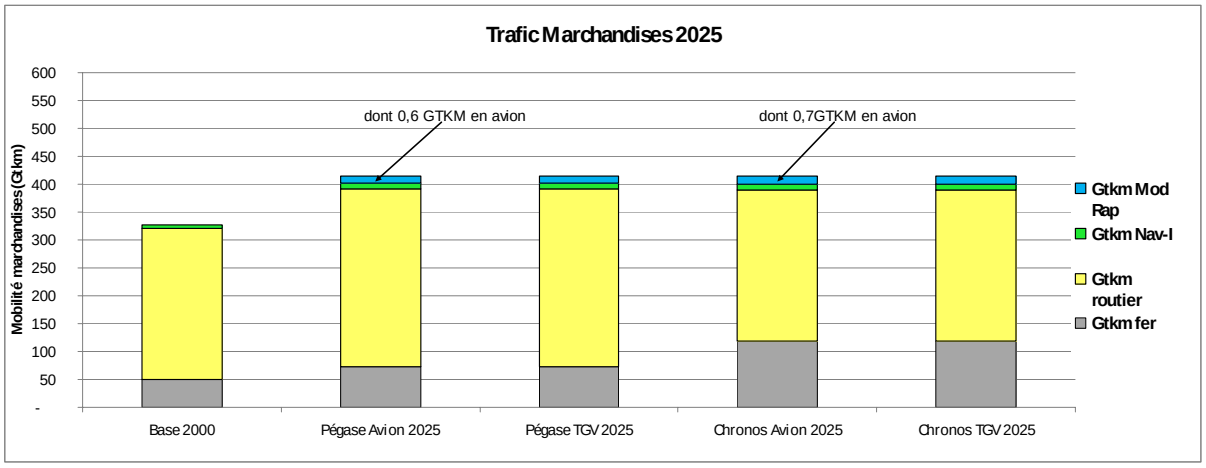
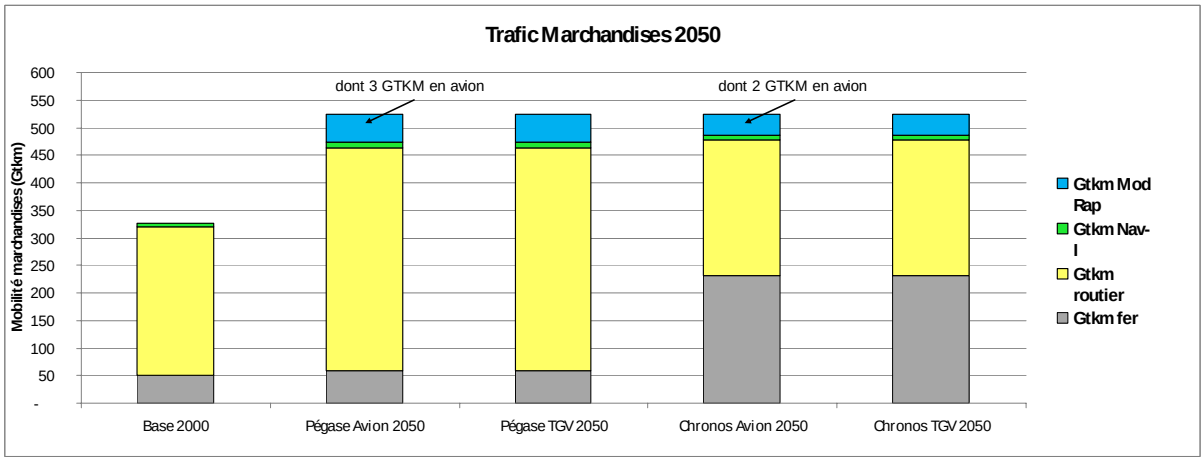


Figure 48 : Trafic Marchandises 2050 dans Chronos



Comme pour les scénarios Pégase, les services de transport de marchandises en urbain et en régional sont supposés être assurés entièrement par la route. Sur la longue distance, TILT calcule donc la répartition modale suivante, cohérente avec le vecteur des vitesses, pour la variante « avion » : 47% pour la route en 2050; 41% pour le rail conventionnel ; 2% pour navigation intérieure ; 7,6% pour le rail rapide et 0,4% pour l'avion. En revanche, pour la variante « TGV » nous avons la même répartition pour le routier et la navigation intérieure mais le rail rapide représente 8% du trafic total. Ceci équivaut à une croissance de 61% pour l'ensemble du trafic, une réduction de 9% pour la route, une croissance de 436% pour le rail et 43% pour la navigation intérieure.

Figure 49 : Trafic et zone par mode- Marchandises

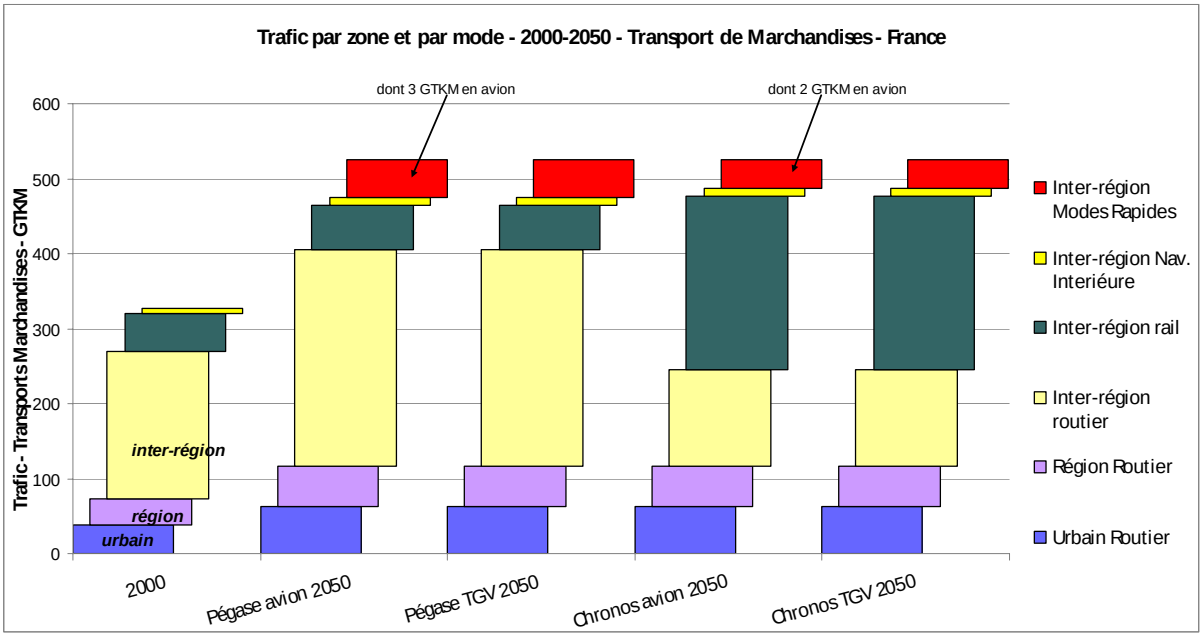


Tableau 21 : Trafic Intérieur

Trafic Intérieur
2000-2050

GTKM	2000	Chronos avion 2050	Chronos TGV 2050
URBAIN	39	62	62
REGION	34	54	54
INTER-REGION	254	408	408
Total	327	525	525
URBAIN			
Urbain Routier	39	62	62
REGION			
Région Routier	34	54	54
	0	0	0
	0	0	0
INTER-REGION	254	408	408
Inter-région routier	197	128	128
Inter-région rail	50	232	232
Inter-région Nav. Interiéure	7	10	10
Inter-région Modes Rapides	-	38	38
dont ferroviaire rapide	-	36	38
dont avion	-	2	-

Du point de vue du trafic international, nous sommes dans une logique semblable au scénario « Régulation par l'économie » du rapport Prospective fret 2030[27]. Dans la famille 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 à une partie grandissante du trafic international a être acheminé par le rail ou par la voie maritime.

Tableau 22 : Trafic International

GTKM	2000	Chronos 2050
International IntraEurope	143	227
Routier-IntraEurope	37	15
Rail-IntraEurope	6	50
IW-IntraEurope	2	3
Avion-IntraEurope	0,13	11
Maritime-IntraEurope	98	149
International ExtraEurope	2398	7918
Routier-ExtraEurope	1	4
Rail-ExtraEurope	0	2
IW-ExtraEurope	1	4
Avion-ExtraEurope	7	23
Maritime-ExtraEurope	2388	7884

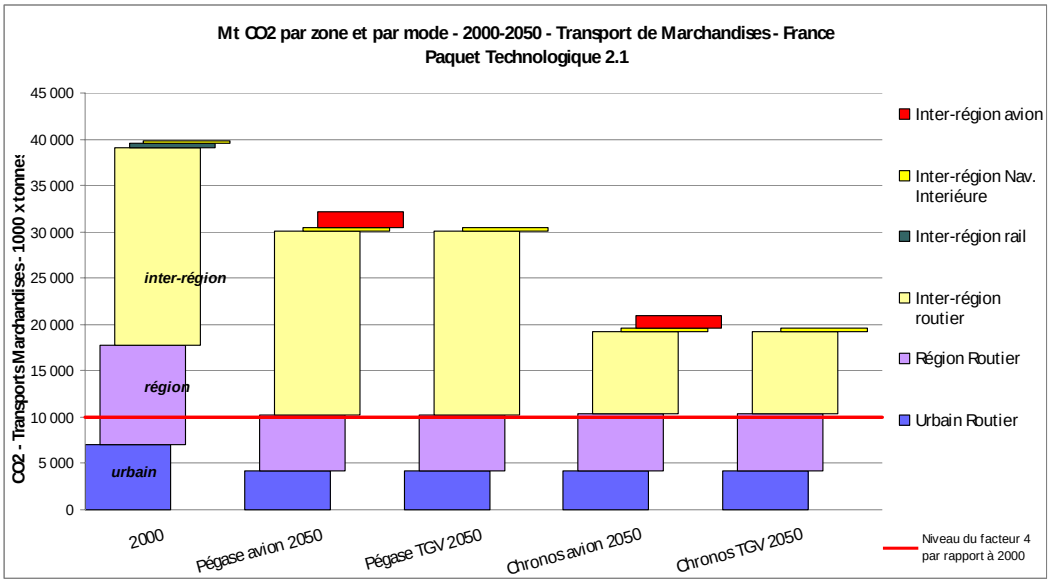
4.2.3.3 Les émissions de GES et le facteur 4 pour les marchandises dans les scénarios Chronos

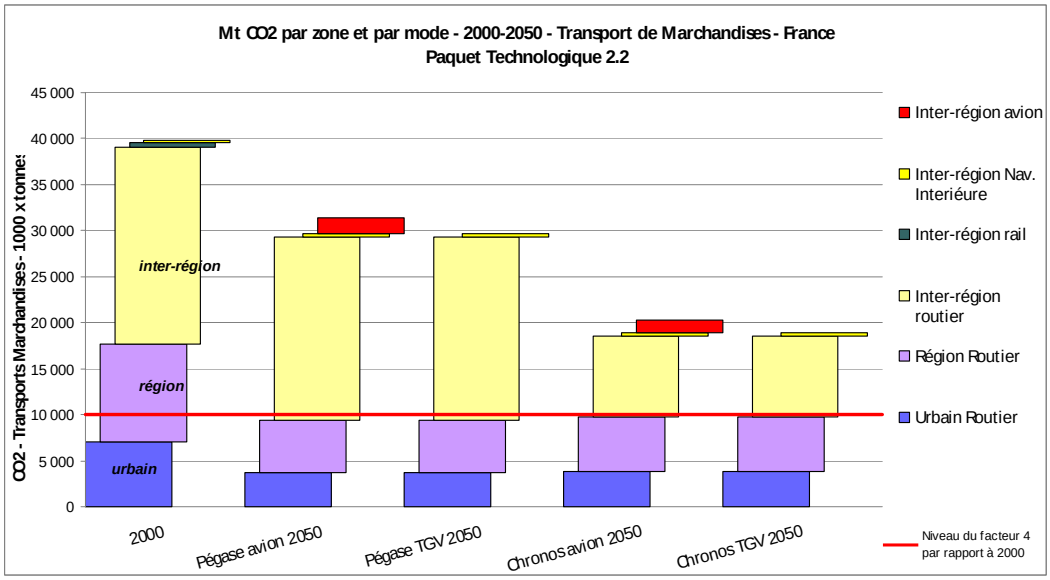
Les émissions du transport de marchandises

Cette famille de scénarios donne une vision où une partie importante des déplacements longue distance sont faits en rail et où les technologies hybrides pourraient avoir un impact important sur l'urbain et le régional. Le transport routier étant diminué en LD mais à son maximum en courte distance, l'utilisation des hybrides sur ces distances peut avoir un impact très important sur le total d'émissions.

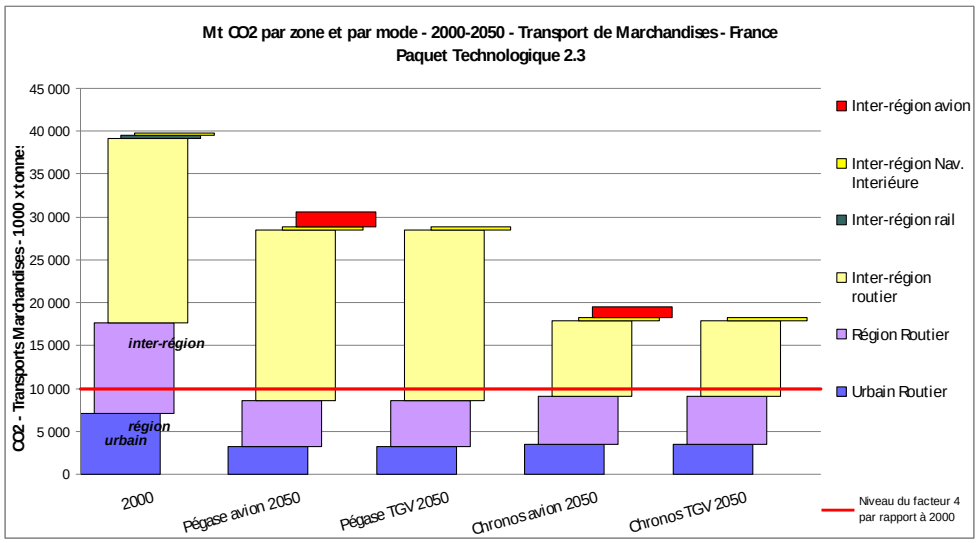
[27] Prospective fret 2030 ; Scénarios contrastés pour le transport de marchandises en France et en Europe. PREDIT 3, GO11, 2007

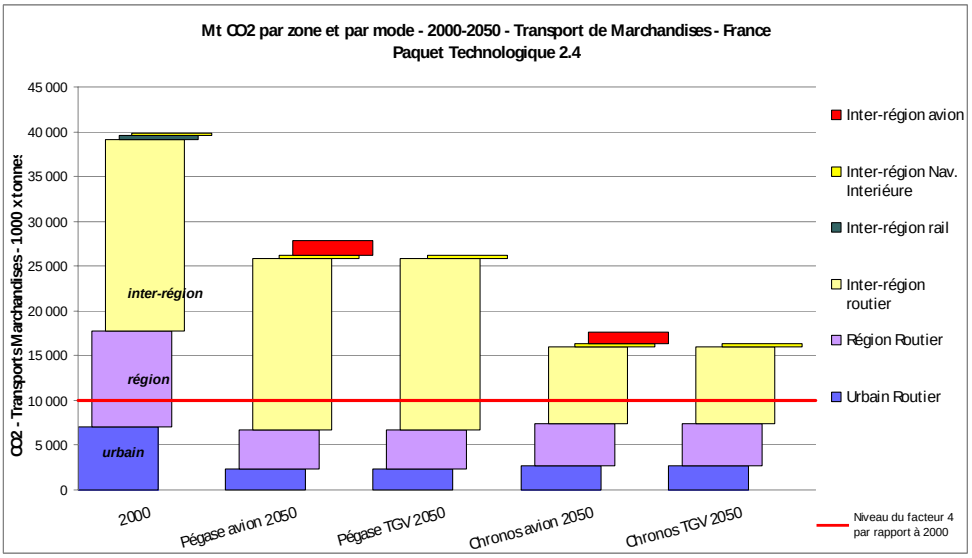
Figure 50 : Emissions de CO2 du transport de marchandises dans Chronos





Pour ces deux premiers paquets technologiques, on observe que le seul trafic de marchandises en urbain et régional sature la contrainte « facteur 4 ». En rajoutant la longue distance, on ne peut guère espérer mieux qu'un facteur 2.





Même si l'on reste dans la logique comptable de l'UNFCCC pour les émissions de CO2-énergie du transport de marchandises, nous restons relativement éloignés du facteur 4 pour le transport de marchandises dans tous les cas. Comme le montre le tableau ci-dessous, les projections se dégradent en outre considérablement si nous comptabilisons le transport international hors de nos frontières.

Figure 51 : Emissions de CO2 du transport international de marchandises dans Chronos

Mt CO2	2000	Chronos 2050
International IntraEurope	5145	21352
Routier-IntraEurope	3941	2224
Rail-IntraEurope	38	0
IW-IntraEurope	67	222
Avion-IntraEurope	120	15677
Maritime-IntraEurope	978	3229
International ExtraEurope	15534	49210
Routier-ExtraEurope	142	290
Rail-ExtraEurope	3	0
IW-ExtraEurope	47	154
Avion-ExtraEurope	2281	5648
Maritime-ExtraEurope	13061	43118

Comment atteindre le facteur 4 dans Chronos pour les marchandises ?

Si, dans une logique backcasting, nous cherchons à comprendre comment arriver au facteur 4 sans aller au-delà du paquet technologique 2.4, c'est-à-dire en accentuant les transferts modaux vers le rail, nous arrivons aux conclusions suivantes.

- Dans le scénario Chronos TGV, il faudrait faire passer 8% du trafic en plus sur le rail ; compte-tenu du développement déjà très important du ferroviaire, conventionnel et rapide, sur la longue distance, c'est en partie sur l'urbain et le régional qu'il serait nécessaire de rechercher ces transferts modaux : par exemple, un basculement de 15% du trafic en urbain et régional sur le rail et de 20% en plus du trafic routier sur le rail en longue distance permettrait d'atteindre le facteur 4, du moins pour les transports intérieurs

- Dans le cas du scénario Chronos avion, l'effort supplémentaire est encore plus important. Pour arriver au facteur 4 en jouant uniquement sur le report modal des marchandises de la route ver le rail, un basculement additionnel compris entre 14% et 19% du trafic serait nécessaire.

4.2.4. Comment vit-on dans Chronos en 2050 ?

4.2.4.1 Petites histoires de passagers…

MARIE et HERVE dans Chronos

Malgré le ralentissement généralisé des vitesses en voiture, Marie et Hervé ont néanmoins choisi de garder leur petite maison à la campagne aux alentours de Roanne (42). Même en étant à 70 km de leur lieu de travail, ils continuent à profiter du jardin avec leurs enfants et des promenades en vélo le dimanche. Comme beaucoup d'habitants de cette zone où l'emploi est peu développé alors que l'habitat pavillonnaire foisonne, Marie utilise quotidiennement en semaine le TER régional express à haute qualité de service (TERHQ) pour gagner Lyon (69). Bien que son temps de déplacement soit chaque jour de 2h30 porte à porte, (son emploi n'étant pas prêt de la gare de la Part Dieu, elle doit prendre le tramway), ce temps de transport lui est vraiment utile, et même indispensable pour se reposer, se détendre et organiser sa journée. A présent, elle ne pourrait y renoncer pour prendre la voiture qui lui ferait perdre le double de temps mais également beaucoup d'argent.

En 2050, avec l'assistance automatique par satellite, la conduite en voiture est en effet devenue une corvée. L'assistance automatique s'est généralisée en 2035 face aux mesures volontaires des autorités ayant laissé la vitesse se dégrader sur le réseau routier sans investir dans de nouvelles rocades, contournements, et voie rapides. Désormais, l'ordinateur se charge de l'ensemble des paramètres de la conduite, de même que la gestion de la vitesse signalée selon les zones par satellite. Le conducteur est désormais devenu passif…et seuls les retraités baby boomers sont satisfaits de ce système qui leur permet de continuer à utiliser leur véhicule et rester autonome.
Lorsque chaque matin, le réveil sonne à 6h15, l'assistance spatio-temporelle au programme d'activités (ASTPA) connecté à internet indique précisément à Marie, (par un système d'affichage intégré au réveil, au réfrigérateur et à son téléphone portable) à quelle heure elle doit prendre sa voiture, pour aller jusqu'à la gare. Ce système d'aide à la décision privée tient compte des conditions climatiques et de la circulation annoncées. Les modèles de trafic, comme les modèles météorologiques, ont désormais une grande fiabilité dans leurs prévisions à dix jours ! Si Marie s'éternise à la salle de bain, l'ASTPA veille…et lui indique qu'elle devra réduire son temps de petit-déjeuner de 3 minutes pour ne pas rater son train.
L'ASTPA s'est désormais généralisé aussi bien dans les véhicules (montée de série sur sa Citronault hybride), sur les téléphones portables de 5ème génération que dans les équipements du domicile. Cette assistance à la programmation des activités soulage chacun dans les difficiles et permanents arbitrages sur le temps. La Citronault de Marie en est équipée de série. Connecté à la gare et aux autres GPSA des automobilistes de la zone, l'ASTPA déduit, à partir des routines des programmes d'activités de chacun et de modèles de trafics élaborés par le Laboratoire d'Economie des Temps (LET)28, la vitesse moyenne pour arriver à la gare TERHQ en prenant en compte le temps pour trouver automatiquement une place de parking. De ce fait, l'ASTPA apporte un confort non négligeable et enlève à Marie le stress de la gestion de l'incertitude sur ton temps de transport.

[28] Créé à la fin des années 1960, le LET, ex laboratoire d'économie des transports, approche de ses cent ans. Après avoir absorbé plusieurs équipes de recherche lyonnaises et grenobloises sur l'ingénierie de trafic et les questions énergétiques, il est devenu le porte drapeau des recherches européennes sur l'optimisation des budgets temps.

Heureusement, car Marie doit penser à bien d'autres choses …Une fois dans le TERHQ, son abonnement fréquence optimale avec garantie de service lui permet de réserver une Cabine Individuelle de Transport à Prestation Intégrées CITPI ou bien de voyager dans des cabines collectives également à prestation intégrées CCTPI. Le train est devenu un lieu de vie quotidien dans lequel, à la manière des paquebots de croisières, il est possible de se reposer, de se divertir, de consommer, de se faire masser (par des machines), de faire des séances de yoga ou bien d'autres activités. Ce forfait de prestations est inclus dans l'abonnement transport à fréquence optimale et les prestataires de services affréteurs de wagons ferroviaires rivalisent d'imagination dans l'offre pour attirer de nouveaux voyageurs alors que la concurrence fait rage et permet de maintenir les prix bas.

Chaque matin, de sa cabine CITPI Marie, en quelques clics de souris, commande ses courses du soir sur le site de CarClerc On line, récente fusion de carrefour online et Leclerc online. Les hypermarchés proposent en effet des livraisons à bord des véhicules « on board delivery » OBD dans des caissons réfrigérés et sécurisés directement dans les coffres des véhicules sur le parking des gares TERHQ. La Citronault est en effet équipée d'un tel système de série ce qui permet des gains de temps et d'effort considérables.

A bord du TERHQ, Marie prend ses rendez-vous médicaux, gère son agenda sur son téléphone portable, répond à ses mails, parle à sa fille par vidéo conférence, avant l'arrivée à la gare de Part Dieu. L'abonnement transport prévoit même une clause « satisfait ou remboursé » au cas ou le client estimerait que son temps de transport n'a pas été utile.
Marie, à son grand regret, ne peut effectuer son ménage, son repas et son repassage à distance mais ces corvées ont déjà été mieux partagées entre les membres du ménage par les progrès de la technologie. Les ordinateurs domestiques sont désormais capables de programmer le temps que chacun (parents, enfants) doit consacrer aux diverses activités domestiques (ranger sa chambre, remplir et vider le lave vaisselle…). Si ces tâches ne sont pas effectuées par la personne responsable, le téléviseur est immédiatement bloqué dans chaque chambre. Si plusieurs membres du ménage délaissent leur tâche, c'est le réfrigérateur qui est condamné !

Désormais, les électroménagers cybernétiques (aspirateurs, aspire poussière, préparateurs culinaires) accomplissent leur tâches de manière programmée. Le concept de la machine à pain est désormais appliqué à tous les usages de préparation culinaire. Il suffit pour cela de recharger le week-end les bacs du réfrigérateur avec les denrées adéquates (lentilles, pattes, poids cassés, condiments) pour être sûr de trouver chaque soir un plat chaud cuisiné avec amour… Quant à la corvée du repassage, elle est réduite à néant grâce aux habits en fibres anti-froissantes à séchage instantané dont la généralisation a relégué le fer à repasser au rang de pièce de musée. Les activités de toutes ces machines ménagères sont commandées par une interface connectée à l'ASPTA que Marie peut consulter du train sur son téléphone portable.

Et ce n'est pas Hervé, le mari de Marie qui se plaindra de ces aides cybernétiques ménagères ! ce qui lui permet de se consacrer à l'essentiel. Chaque jour, Hervé conduit sa fille, Marta, à l'école située à 20 minutes de son domicile avant de se rendre au travail. Il utilise pour cela la deuxième voiture du ménage, une Prius d'occasion de 4ème génération (un ancien modèle avec une autonomie de 50 km contre 100 km pour les nouveaux).

Le système d'aide au chargement et déchargement automatique d'enfants (Automatic loading and unloading of children ALUC) dont est équipée la Toyota a permis des gains de temps considérable et évité bien des Lumbagos. Hervé n'a qu'à présenter la poussette devant le capteur pour que la porte coulissante s'ouvre et charge automatiquement Marta dans sa poussette. Un biberon tiède lui est automatiquement servi, un contrôle de la propreté de la couche est effectué et un DVD démarre pour lui apprendre de manière accélérée la langue française. Hervé suit tout cela de son tableau de bord (température du biberon, choix du DVD), tout en parlant à Marta.

Durant le trajet vers l'école, l'ASPTA indique à Hervé les personnes intéressées (jusqu'à 3) par un trajet de covoiturage parmi la liste des affiliés. Il s'agit souvent de collègues de travail, d'amis ou de voisins. Le covoiturage est devenu un moyen d'économiser les frais de déplacement (devenus élevés). Depuis la mesure de modulation du prix des autoroutes et la généralisation des péages à l'entrée des villes mieux vaut avoir un véhicule hybride à faible émissions ou être en covoiturage pour ne pas payer un prix exorbitant… Ce n'est pas pour autant une contrainte dans la mesure où la connexion ASPTA a rendu le covoiturage très facile avec la coordination en temps réel qui minimise les pertes de temps. En outre, une connexion par carte bancaire à l'intérieur même des véhicules permet un paiement instantané de la part des covoiturés. Et puis désormais, l'on s'ennuie bien moins en voiture, cela a même resserré les liens entre les personnes du lotissement, de l'entreprise. Ce matin, Hervé est connecté avec Jean Pierre un collègue et Kevin, un membre du club de tennis, l'ASTPA leur indique que d'ici 1h00, ils seront tous les trois au travail. Quant au retour de Marta le soir, il est pris en charge par l'école; Marie ayant souscrit au service des devoirs on board SBD.
Pour que les enfants puissent terminer leurs et bénéficier du soutien scolaire d'un éducateur, un car spécialement aménagé ramène les enfants à leur domicile. Compte tenu de la vitesse faible à laquelle se déplace le car et du système anti-roulis, les enfants peuvent répéter leurs leçons sans avoir le mal de mer.

Le soir, de retour à la maison, place au temps à haute qualité THQ. Suite à la promesse électorale de la présidente de la République qui garantit une dotation fixe de temps libre de haute qualité de 19h00 à 22h00 (14.5% de 24h) le temps libre fait l'objet d'un pointage au même titre que le temps de travail. Le respect de cette dotation dans les ménages de deux actifs (par pointeuse au domicile) a pu permettre à Marie et Hervé de rester dans leur zone d'habitation. En effet, si cette dotation fixe n'avait pu être respectée par tous les membres de la famille, de même que la part du budget transport dans le revenu du ménage fixée à 15%, Marie et Hervé auraient dû choisir une maison dans une zone plus proche de leur lieu de travail afin de rétablir les équilibres dans les programmes d'activités et ainsi obtenir leur crédit immobilier…. Ce temps de haute qualité n'est pas un temps domestique, ni un temps de course mais un temps de loisir et repos.

Ce soir, devant la cheminée factice (flamme électrique sans CO2), la famille utilise son quota THQ (temps haute qualité) et parle des futures grandes vacances. Marie aimerait bien partir en Espagne pour se dépayser. Depuis la flambée des prix du pétrole en 2020, l'avion est devenu hors de prix, quant à la voiture, elle est depuis longtemps trop lente avec les limitations à 115 km/h sur les autoroutes et trop limitée en autonomie, ce qui implique de faire quelques kilomètres en carburant fossile hors de prix (5€ / l). Il est bien plus avantageux et agréable pour une famille de voyager en TGV haute qualité de service (TGVHQS) moins cher que l'avion. Marie se charge de réserver la cabine à prestations intégrées du TGVHQS sur la ligne

Lyon-Séville. L'ASTPA prendra ensuite automatiquement le relais en se chargeant de gérer et d'optimiser le trajet pour aller à la gare et la location d'un véhicule hybride sur place.

Ce week-end, comme tous les 15 jours, ils iront rendre visite à leurs parents qui vivent à Grenoble. Le TERHQ est là encore bien pratique pour effectuer le déplacement, la voiture étant devenue trop lente et n'offrant pas la possibilité de profiter des multiples activités du TERHQ. Le samedi matin, l'ASTPA indique à Marie et Hervé le temps nécessaire pour rejoindre la gare. La Citronault hybride les y amène en moins de 15 minutes. Le temps pour aller à Grenoble en partant de Roanne est de 2h00 mais ces deux heures leur permettent de programmer les courses de la semaine et de faire le tour des boutiques dans le train. Le grand père, lui aussi relié à l'ASTPA, les attend à la gare de Grenoble en voiture. A 105 ans, la conduite assistée en ville ne lui pose aucun problème, certes, suite aux mesures généralisées de mise en place des péages pour accéder au centre des villes, l'accès au centre de Grenoble n'est pas parmi les moins chers, mais c'est avec plaisir qu'il utilise sa Citronault pour faire un petit tour. Le seul qu'il s'est autorisé cette semaine. Son épouse dit qu'il en a besoin pour se remémorer l'époque bénie où il faisait Grenoble – Lyon en moins d'une heure avec sa première voiture : une Renault 8 Gordini d'occasion qu'il s'était offerte en 1966 avec sa première paie !

Les « San Diego » famille emblématique des scénarios Chronos

La famille San Diego vit en périphérie urbaine, les deux parents travaillent car deux salaires sont nécessaires pour élever les trois enfants, rembourser les emprunts liés à l'achat du pavillon et financer les deux voitures indispensables pour assurer la mobilité des quotidiennes des cinq membres du foyer, auxquels s'ajoutent souvent l'un ou l'autre des grands parents. Ces derniers font souvent avec leurs enfants du covoiturage pour aller au supermarché, tout comme les voisins des San Diego, qui se sont organisés avec eux pour rationaliser les accompagnements et autres déplacements. Tout cela demande une assez bonne organisation, le téléphone portable est indispensable pour chaque membre de la famille. Heureusement, ces téléphones donnent aussi accès à la vidéo et aux journaux en ligne. Cela permet d'occuper une grande partie du temps perdu à attendre la voiture des voisins pour le retour de l'école ou de l'entraînement de football. Dans les transports en commun aussi, internet est disponible. Aussi, pour se rendre au lycée, la longueur du trajet est-elle compensée par la possibilité de rester en ligne, pour le « chat » ou le « surf », très utile avant un exposé. Chaque année, la famille s'offre un séjour outre-mer en utilisant les tarifs imbattables des compagnies Low Cost, qui ont elles aussi équipé leurs avions (et les salles d'attente) d'un accès internet (au prix d'un supplément…).

4.2.4.2 Comment transporte-t-on les marchandises ?

Evénements, législation et décisions	Analyse économique	Technologie	Collecte	Distribution	Inter-entreprise
Introduction progressive de la taxe sur le CO2 d'ici 2030 et tarification de la route est introduite. Le trafic routier des marchandises non fortement spécialisées devient non rentable sur les longues distances. Tous les terminaux, plateformes et conteneurs sont équipés de systèmes d'information intelligents afin d'optimiser la chaîne de transport et l'expédition des conteneurs. La révolution de la nouvelle technologie du transport combiné est permise grâce à la nouvelle taxe sur le CO2 et la réorganisation de la logistique en Europe. La possibilité de combiner de plus grands volumes de transport sur certains itinéraires rend le transport combiné économiquement très intéressant.	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, notamment à cause de l'hausse de la productivité (obtenue grâce à une hausse de l'efficacité logistique) et une utilisation accrue du ferroviaire et de la voie d'eau (qui ont des coûts plus bas que le routier). Les anciennes préférences pour les achats hebdomadaires dans les hypermarchés sont encore vivantes. La diminution des vitesses moyennes est accompagnée d'une diminution des accidents de la route et la performance des chaînes logistiques est basée sur l'importance de son réseau et de la praticité des chaînes logistiques intégrées. L'importation des	Le transport ferroviaire propose des solutions de plus en plus adaptées aux contraintes sur les vitesses (qui poussent le coût généralisé du transport à l'hausse) en même temps qu'il se livre à une rude concurrence avec les 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'acharnent pour trouver des batteries moins lourdes avec une autonomie accrue. Cette recherche est destinée à trouver des véhicules qui puissent concurrencer au niveau régional et interrégional avec les véhicules hybrides et le ferroviaire. Le « Réseau Trans-Européen de Transport Ferroviaire de Fret » est crée. Ce réseau vise à créer un réseau de	Comme la baisse des vitesses, pousse le coût généralisé du transport à l'hausse. Les acteurs répondent à cette hausse en augmentant la productivité et en se reportant sur des transports moins couteux. Ainsi, le coût HT du transport reste relativement le même. De ce fait, le système de collecte est revu afin d'offrir les valeurs les plus basses possibles en consommation de carburant fossiles (pour réduire le poids des taxes liés 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 multimodale. Le système de collecte est un des éléments clés pour cette association. Des nouveaux centres de collecte multimodaux voient le jour afin de rendre l'utilisation de	Un report important de la route au fer à l'échelle régionale et interrégionale s'est produite en réponse à l'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 à être transportée par la route. Sur l'échelle régionale et urbaine, le nombre de Vkm routiers continue à augmenter de manière importante car la taille réduite des PL et des VUL (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 plus de véhicules. Cette	Le « JAT » reste le mode dominant de gestion. Néanmoins, les marchandises passent plus de temps en transport ce qui pousse à repenser le stockage. Le 3PL devient 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 sur la vitesse sont intégrés par le système logistique qui répond en faisant plus de transport sur le fer et sur l'eau. Le coût monétaire du fer et de l'eau par rapport à la route permet d'absorber les hausses du coût général de transport. Du côté des logisticiens, la pratique de la massification devient l'ordre du jour, les dépôts communs se généralisent. Le transport des marchandises suit une logique logistique de

	produits frais de divers endroits du monde est réduite, mais les produits sont toujours disponibles à des prix plus élevés du fait de leur contenu énergétique élevé.	chemins de fer consacré exclusivement au transport transeuropéen de fret. Le réseau est entièrement financé par les taxes CO2 prélevées sur les carburants moteurs.	véhicules hybrides plus efficace. Pour jouir pleinement des avantages des centres de collecte multimodaux, les grands groupes font appel de plus en plus 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.	hausse de Vkm sur des véhicules moins polluants mais avec une taille inférieure a permis d'éviter des taxes lourdes liées à l'émission de CO2.	maximisation des tonnes livrées avec une minimisation des distances routières, sous contrainte de l'autonomie des véhicules.

4.2.5. Les enseignements de Chronos pour le facteur 4 et les politiques publiques

4.2.5.1 La mobilité durable dans les scénarios Chronos

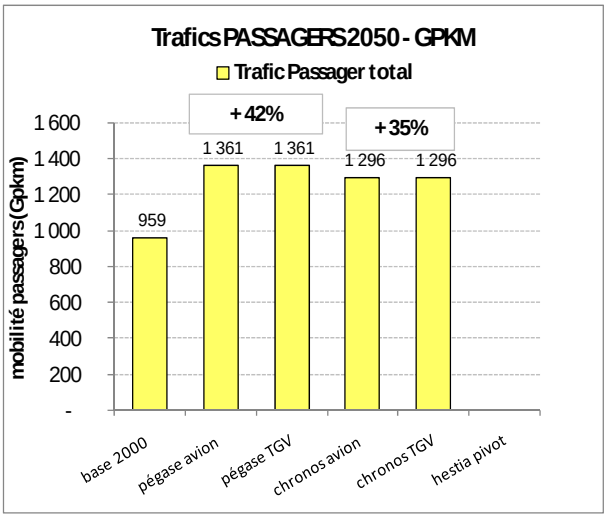
On s'attache ici à globaliser les projections d'émissions de CO2 auxquelles conduisent les différents paquets technologiques « raisonnables » pour les passagers et les marchandises, en prenant en compte les émissions indirectes liées aux différentes filières du puits à la roue.

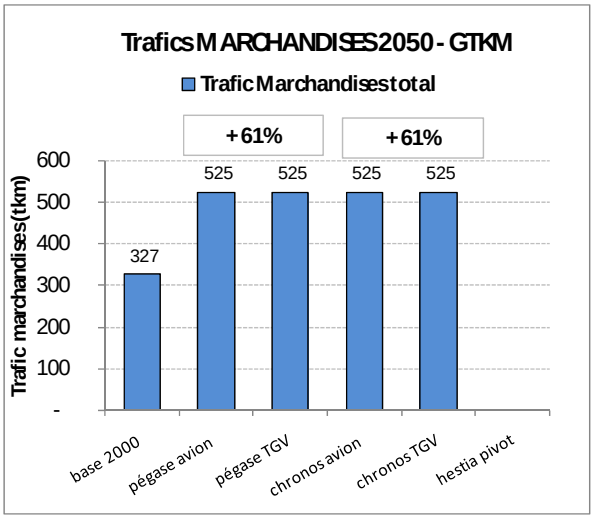
Deux aspects seront traités dans cette présentation :

- Où nous conduisent les trafics Chronos et les technologies du paquet 2 au regard des émissions de CO2 du système de transport ?
- Que faudrait-il faire en plus, si besoin, pour atteindre globalement le facteur 4 dans ces scénarios Chronos ?

Les émissions directes de CO2-énergie des transports n'atteignent le facteur 4 qu'avec le seul paquet technologique 2.4, dans la variante TGV

Le graphique ci-dessous récapitule les projections de trafic des personnes et des marchandises:



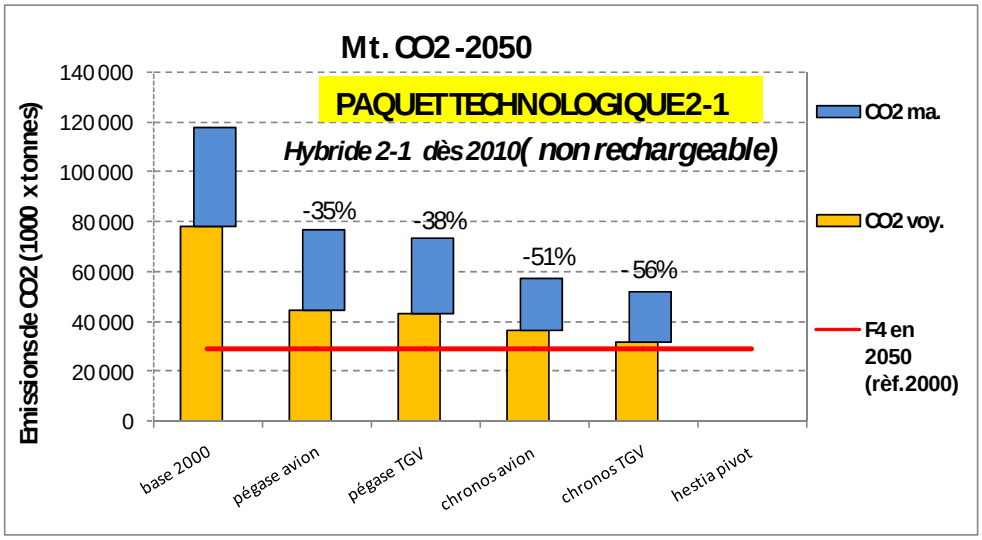


Ces augmentations de trafic vont de pair avec une baisse des émissions de CO2, toutefois moindre que celle constatée pour les seules émissions directes du transport de passagers. Ce constat est valable quelque soit le paquet technologique utilisé.

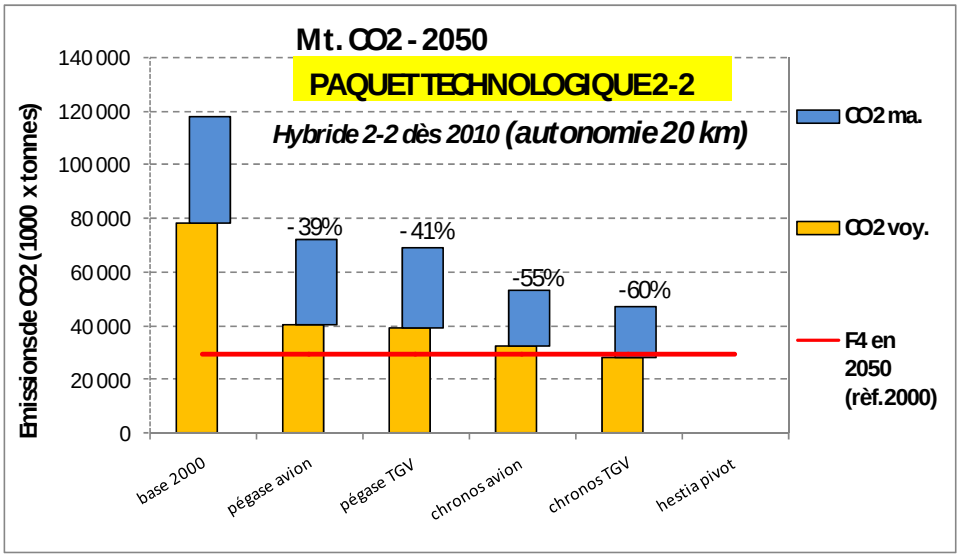
Le paquet technologique 2-1, qui correspond à une généralisation des véhicules et camions (PL et VUL) hybrides non rechargeables dans le parc en 2050, conduit aux réductions suivantes :

- Réduction de 51% des émissions directes de CO2 dans la variante Avion intégrée (contre 35% dans la variante Avion du scénario Pégase),
- Réduction de 56% dans la variante TGV intégrée (contre 38% dans la variante TGV du scénario Pégase).

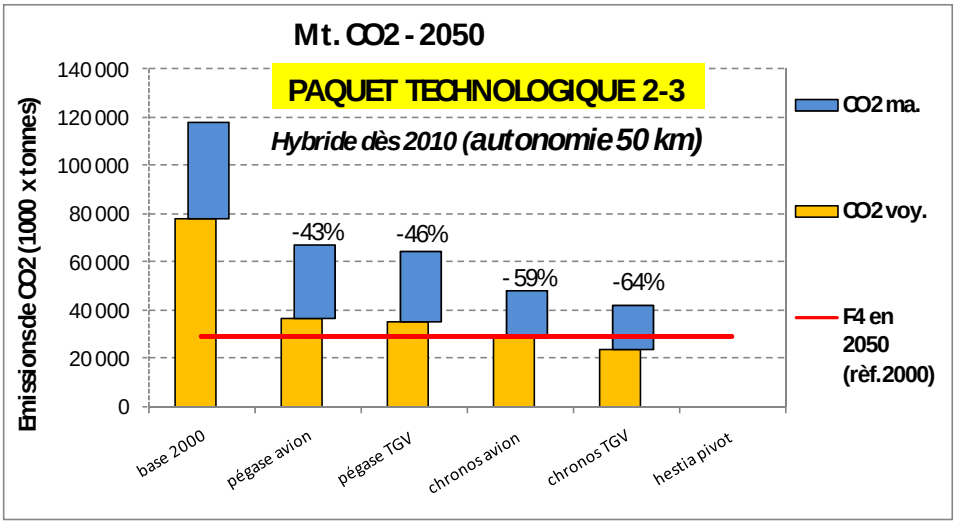
Figure 52 : Emissions directes de CO2 de l'ensemble du transport dans Chronos



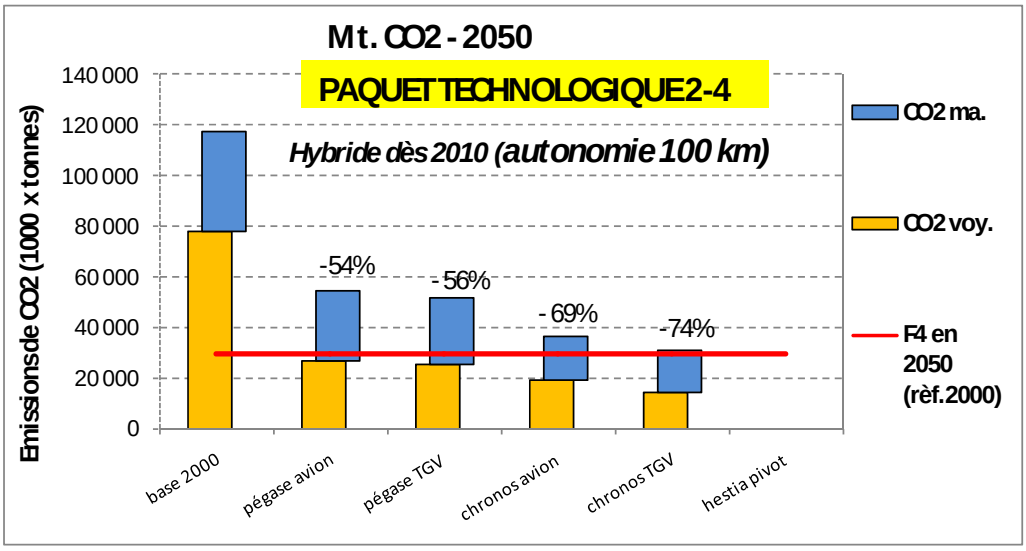
Dans le cas du paquet 2-2, correspondant à une généralisation des hybrides rechargeables bi-énergie avec faible autonomie, la réduction des émissions directes totales atteint respectivement 55% et 60% en 2050 selon les variantes (39% à 41% dans Pégase).



Dans le cas du paquet 2-3, correspondant à une plus grande autonomie des batteries, les réductions d'émissions directes atteignent respectivement 59% et 64% selon les variantes (43% et 46% ans Pégase).



Dans le cas du paquet 2-4, où l'autonomie des batteries est forte, les réductions d'émissions directes totales des transports atteignent respectivement 69% et 74% selon les variantes (54% et 56% dans Pégase), soit, pour la variante TGV, un niveau très proche du facteur 4.



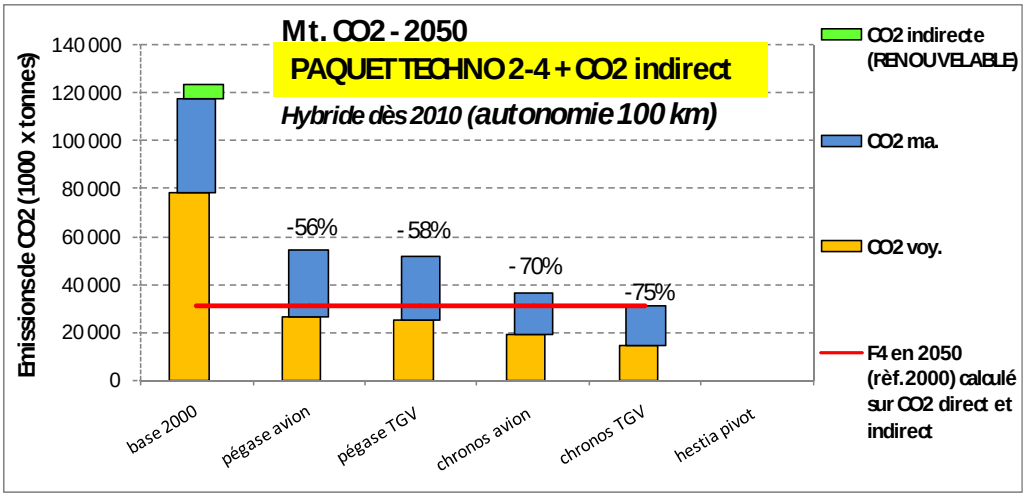
Parmi toutes les configurations testées, seule la variante Chronos TGV intégrée (marchandises + passagers) atteint le facteur 4 pour les émissions directes avec le parquet technologique 2-4. Rappelons que cette configuration technologique correspond à l'introduction des véhicules hybrides rechargeables d'une autonomie de 100 km dés 2010. Dans ce cas, la baisse des émissions est alors de 74% par rapport à l'année de base. En revanche, la variante Chronos Avion ne parvient pas au facteur 4 du fait de l'absence de marge de manœuvre réalisée sur les passagers.

On peut atteindre le facteur 4 avec les émissions indirectes dans Chronos

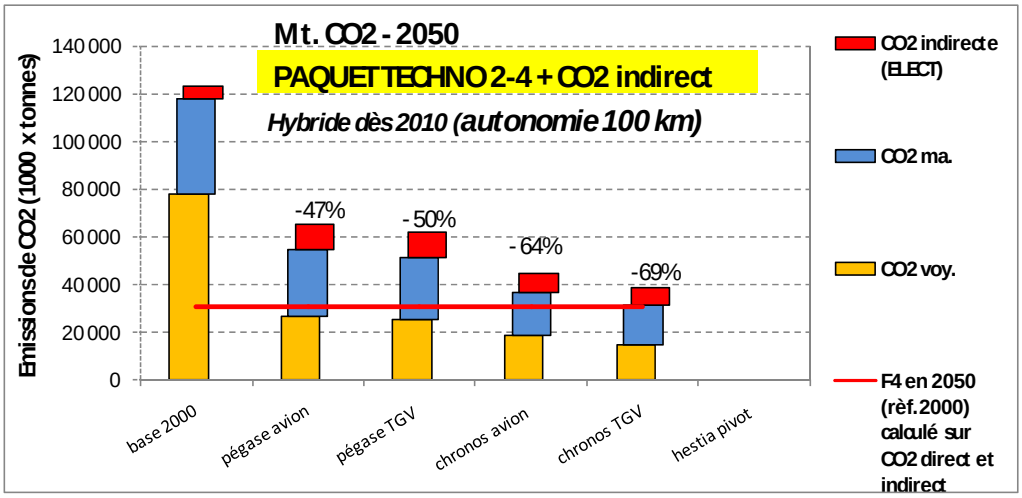
La prise en compte des émissions indirectes du raffinage, de la production d'électricité et de la production de biocarburants nous éloigne sensiblement de l'objectif F4 dans la plupart des

cas, sauf celui où l'électricité pour le transport est produite intégralement avec du nucléaire et des renouvelables en 2050.
Dans ce cas, la baisse des émissions directes et indirectes atteint bien les 75% (facteur 4) dans la configuration la plus favorable : variante TGV couplée avec le paquet technologique 2.4. (contre 74% pour les seules émissions directes)

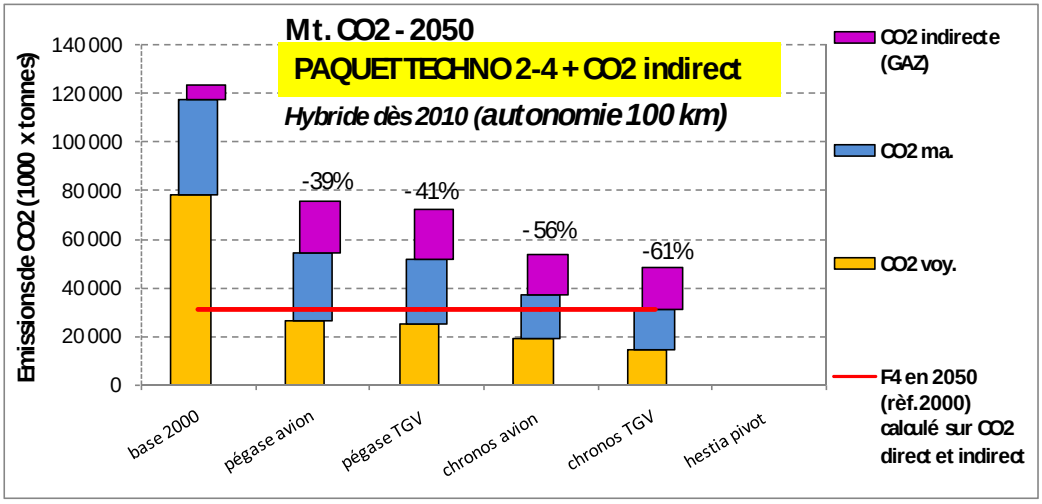
Figure 53 : Emissions directes et indirectes de CO2 de l'ensemble du transport dans Chronos



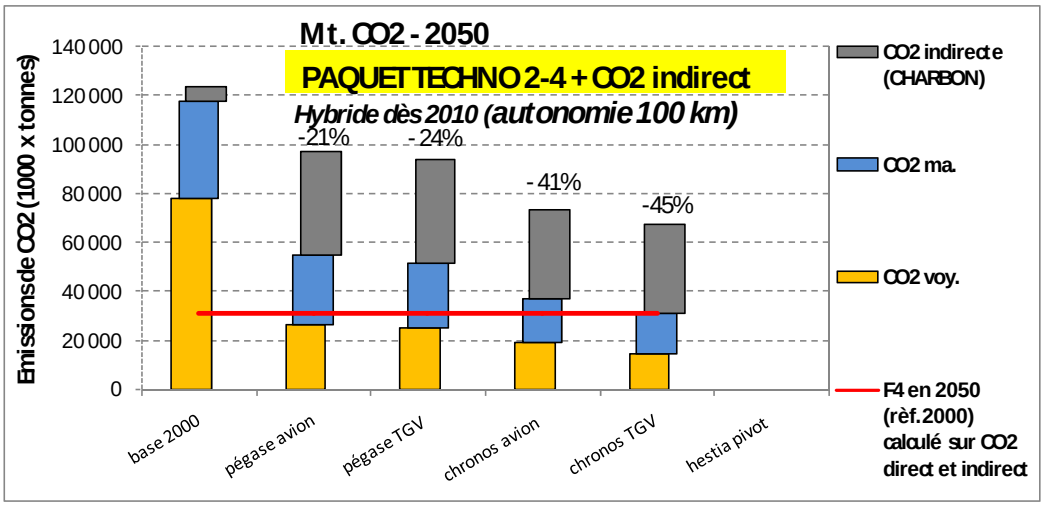
Avec une structure moyenne de production de l'électricité de réseau cohérente avec l'objectif facteur 4 (cf. travaux de la Commission de l'Energie 2007 sur le F4), la baisse des émissions directes et indirectes n'atteindrait plus, au mieux, que 69% (variante TGV couplée avec le paquet technologique 2.4)



Si l'électricité utilisée par le ferroviaire, les hybrides et les véhicules électriques devait être produite entièrement à partir de cycle combiné gaz performant, la réduction d'émissions directes et indirectes n'atteindrait au mieux que 61%



Si, enfin, cette électricité devait âtre produite à partir de centrales conventionnelles à charbon, la baisse des émissions globales pourrait être limitée à 45% (soit moins que le paquet 2-1).



Comment atteindre le facteur 4 dans Chronos ?

Avec la prise en compte des émissions indirectes et modulo la question des règles comptables à appliquer, une généralisation du paquet technologique 2.4 dans la variante TGV de Chronos conduit de fait au facteur 4.

Ce n'est pas le cas de la variante Chronos avion, qui apparait pourtant comme une vision peut-être plus probable de la mobilité à l'horizon 2050 dans Chronos. En effet, Chronos avion laisse une marge de progression à l'aérien de 60%, en phase avec ce que l'on observe aujourd'hui, et ne conduit pas à des changements brutaux hormis pour la baisse de la part modale de la voiture en longue distance, baisse qui s'inscrit d'ailleurs dans les tendances actuelles.

Par conséquent, si Chronos avion apparait comme une limite raisonnable des possibles, et que cette limite est proche du facteur 4 sans pour autant l'atteindre, il est intéressant de se

demander quel effort additionnel permettrait d'atteindre le facteur 4 dans cette variante ? L'atteinte de l'objectif serait néanmoins soumis à certaines conditions telles que :

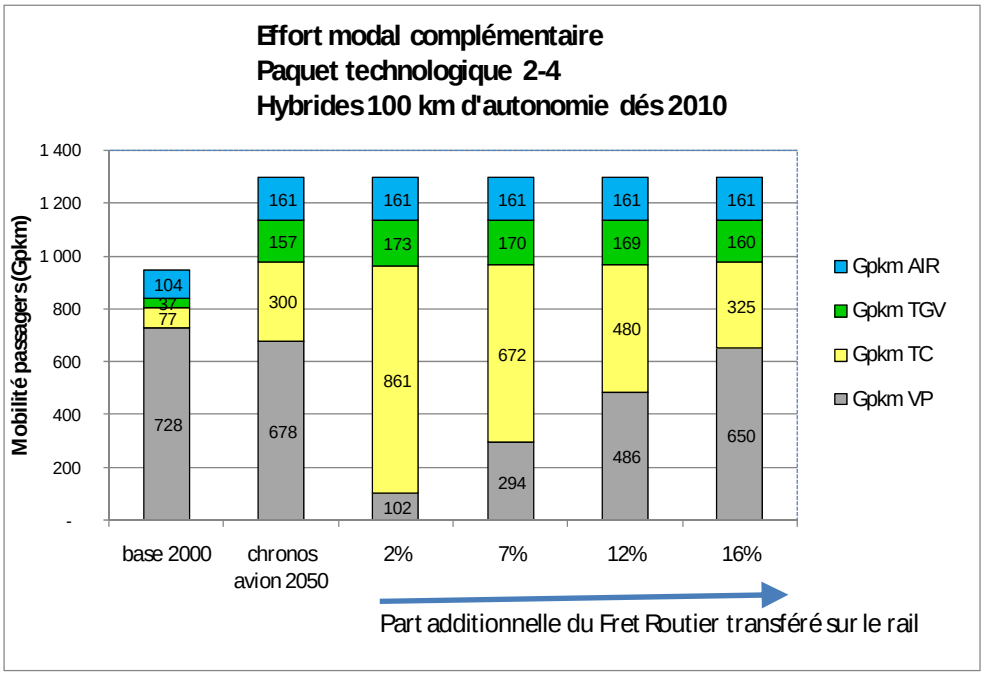
- un sentier technologique « raisonnable » identifié dans le paquet 2-4 qui exclut l'introduction des technologies de Piles à combustible.
- la « sanctuarisation » de la progression de l'avion à hauteur d'une progression limite de 60% des trafics par rapport à l'année de base.
- aucune baisse additionnelle des vitesses
- un trafic global maintenu constant

La question revient alors à se demander s'il est possible d'atteindre le facteur 4 dans Chronos avion à iso-technologie, iso-vitesse, iso-trafic global et iso trafic avion, ce qui implique de jouer exclusivement sur les reports modaux. Dans cette perspective, les deux principaux leviers pour dégager des marges de manœuvre sont les suivants :
- basculer davantage de Fret routier vers le fret ferroviaire,
- diminuer la part modale de la VP, ce qui revient à diminuer son kilométrage annuel moyen

Quels sont les arbitrages à réaliser sur ces leviers pour conserver l'avion ?

Le graphique ci-dessous présente différentes configurations modales permettant d'atteindre le facteur 4 à partir d'un effort additionnel sur Chronos avion :

Figure 54 : Arbitrages fret/passagers pour atteindre le facteur 4 dans Chronos avion



L'effort est réparti sur les marchandises et les passagers, les quatre variantes testées à droite de Chronos avion atteignent toutes le facteur 4. Le principe d'ajustement est le suivant :

Plus la part additionnelle des marchandises basculée du fret routier vers le fret ferroviaire est importante (elle passe de 2% à 16%), moins l'effort additionnel en terme de déformation

modale sur les passagers est important par rapport à la configuration initiale de Chronos avion.

- Avec un transfert modal de 16% pour les marchandises, la déformation des parts modales est minime sur les passagers par rapport à la variante Chronos avion. Elle se traduit par une baisse additionnelle de 4% du trafic VP par rapport à Chronos avion, une hausse additionnelle de 8% du trafic TC et de 2% pour le TGV. Le kilométrage annuel moyen de la voiture baisse de 4% de 12 000 km à 11 500 km.

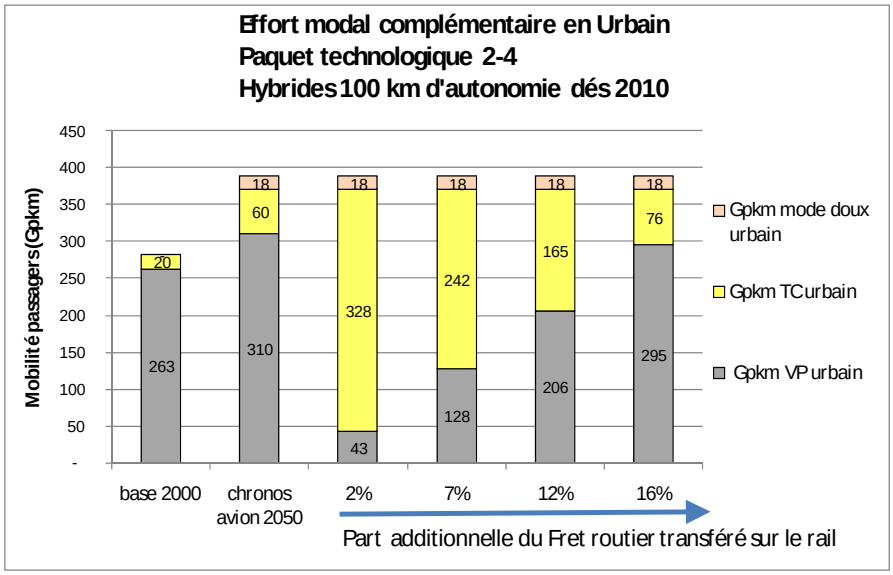
- Avec un transfert modal de 12% pour les marchandises, la déformation des parts modales commence à être significative par rapport à la variante Chronos avion. Elle se traduit par une baisse additionnelle de 28% du trafic VP par rapport à Chronos avion, une hausse additionnelle de 60% du trafic TC et de 8% pour le TGV. Le kilométrage moyen de la voiture baisse de 28% de 12000 km à 8 600 km.

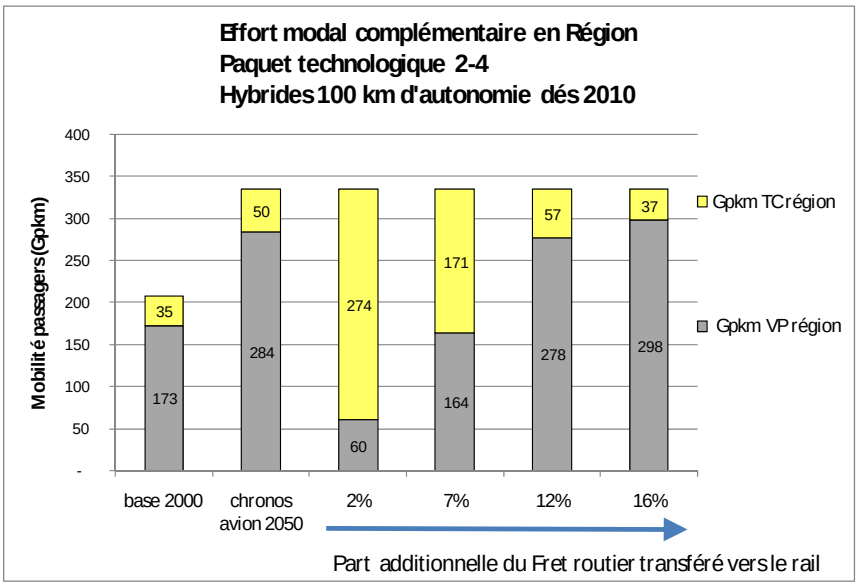
- Avec un transfert modal de 7% pour les marchandises (soit un effort plus faible), l'effort sur les passagers est très significatif et se situe sans doute à la limite des possibles. Il se traduit par une baisse additionnelle de 57% du trafic VP par rapport à Chronos avion, une hausse additionnelle de 124% du trafic TC et de 8% pour le TGV. Le kilométrage annuel moyen de la voiture baisse de 57% de 12000 km à 5 200 km.

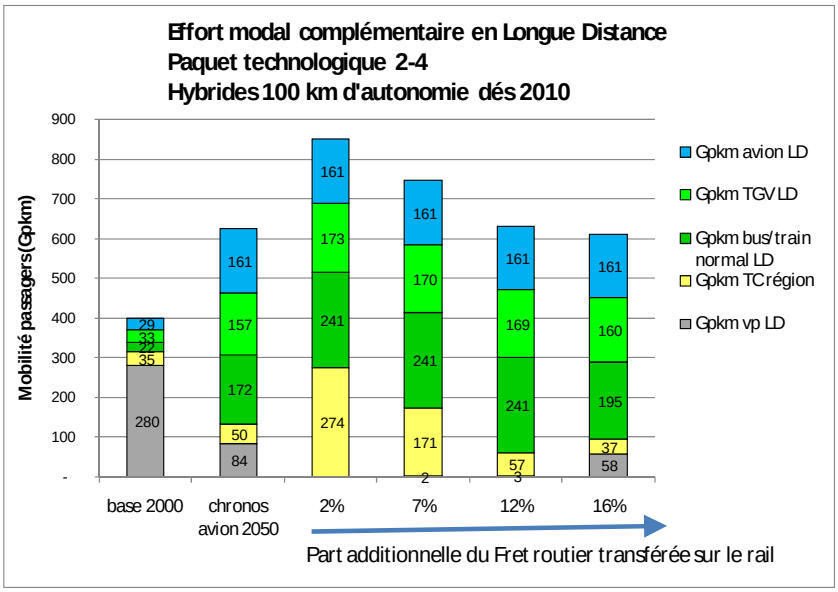
- Avec un transfert modal de 2% pour les marchandises (effort minimal), la déformation des parts modales est extrême au regard de la variante Chronos avion. Elle se traduit par une baisse additionnelle de 85% du trafic VP par rapport à Chronos avion, une hausse additionnelle de 187% du trafic TC et de 8% pour le TGV. Le kilométrage annuel moyen de la voiture s'effondre de 85% de 12000 km à 1 800 km.

Les graphiques ci-dessous mettent en lumière les arbitrages modaux dans les différentes zones :

Figure 55 : Arbitrages fret / passagers par service de mobilité pour atteindre le facteur 4 dans Chronos







Dans chaque zone, la part de la voiture diminue avec la baisse de l'effort de report sur les marchandises.

- en urbain : la part modale de la VP est de 80% dans Chronos avion. Elle passe à 76% avec 16% de report marchandises, et à 11% avec 2% de report marchandises.
- en région : la part modale de la VP est de 85%. Elle augmente à 89% avec 16% de report marchandises pour descendre à 18% avec 2% de report marchandises.
- en longue distance : la part modale de la VP est de 15%, soit un niveau déjà très bas par rapport à l'année de référence (77%). Elle passe à 10% avec 16% de report marchandises à 0% avec 2% de report marchandises.

Il ressort de cet exercice deux enseignements :

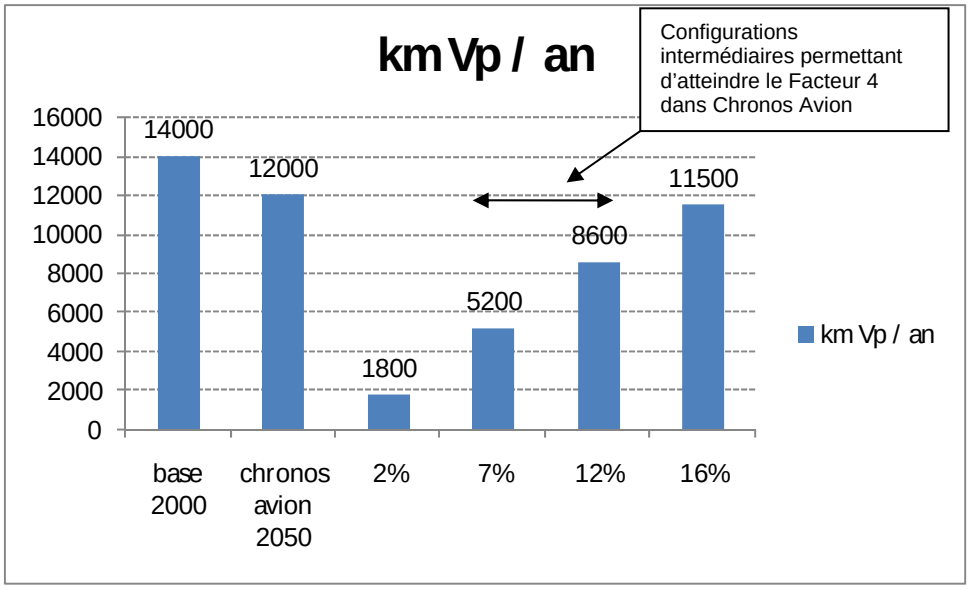
- Atteindre le facteur 4 en maintenant l'avion et en maintenant un principe de précaution sur la contribution des technologies, implique inexorablement des arbitrages. L'arbitrage principal se jouant entre les modes émetteurs CO2.

Aux deux extrémités du curseur, nous avons :

- un très faible effort sur les marchandises correspondant au faible développement du ferroutage (2% de report additionnel) conduit au quasi renoncement de la voiture.
- un effort très significatif sur les marchandises correspondant à un fort développement du ferroutage (16% de report additionnel) conduit au maintien de la voiture dans sa configuration actuelle.

Entre ces deux extrêmes, on peut supposer que la solution intermédiaire réside dans les configurations mettant en œuvre des reports significatifs (entre 4 et 12%) correspondant à des kilométrages annuels moyens des VP compris entre 5 200 km et 8 600 km.

Figure 56 : Impact sur l'utilisation de la VP des arbitrages fret / passagers pour atteindre le facteur 4 dans Chronos



4.2.5.2 Quelles politiques publiques dans Chronos ?

Au-delà du nécessaire soutien à l'innovation technologique dans les transports (hybrides rechargeables bi-énergie, solutions logistiques, transport ferroviaire rapide de fret,..), le défi majeur des politiques publiques dans le scénario Chronos est celui de la maîtrise de la vitesse par la réglementation et la tarification. Il s'articule autour des idées-force suivantes:

- réduire les vitesses autorisées sur toutes les infrastructures routières, de 10 à 20% selon les cas ;
- soutenir le développement de l'offre de transport ferroviaire, des TCSP urbains au transport rapide de fret, en passant par l'intermodalité ;
- accompagner ces deux axes d'intervention avec une politique de tarification des infrastructures et de taxation des carburants reflétant l'ensemble des externalités, les émissions de CO2 au premier chef.

Le tableau ci-dessous synthétise l'expression des politiques publiques dans les scénarios Chronos, selon les conventions adoptées dans la méthode d'évaluation des politiques publiques présentée plus haut.

Tableau 23 : Mesures phares des politiques publiques dans les scénarios Chronos

INTENSITE	CHRONOS	CHRONOS TGV
Prix et taxes		
Taxe CO2	2	3
Taxation des camions à la tonne-km	3	3
Péages routiers pour les maxicodes	3	3
Subventions au transport multi-modal	3	3
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	2	2
Réduction des taxes et subventions sur les ENR	2	2
Subventions au véhicule electrique	2	2
Subventions au véhicule urbain	2	2
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	2	2
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	2	2
Bonus/malus en fonction des taux d'émission	3	3
Péage sur les voies urbaines rapides	3	3
Péage sur les artères urbaines	3	3
Péage sur les autoroutes	3	3
Incitations/taxation usage des VP des employés	3	3
Réglementation		
Normes CO2 pour les VP	2	2
Renforcement des limites de vitesse	3	3
Contrôle plus strict des vitesses et tremps de conduite des PL	3	3
Organisation du transport au niveauEuropéen	3	3
Harmonisation des réglementations nationales pour le rail	3	3
Investissements, aménagement		
Extension des infrastructures pour le fret et les passagers	3	3
Extension des infrastructures TGV	2	3
Extension du réseau multi-modal route/fer, route/VE	3	3
Meilleur service et logistique pour le rail fret	2	3
Priorités aux véhicules de transport public	3	3
Financement des extensions de transports régionaux rapides	3	3
Accroissement des fréquences, extension des dessertes	3	3
Extension du stationnement payant	3	3
Fixation d'un prix minimum du stationnement	3	3
Réduction des espaces habilités au stationnement	3	3
Amélioration des pistes cyclables et autres voies piétonnières	3	3
Centre-villes sans voiture	3	3
Extension des zones urbaines limitées à 30km/h	3	3
Plan de Déplacement Urbain pour les villes > 100 000 h	3	3
Autres		
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	2	2
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	2	2
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	2	2
Programmes nationaux d'information du grand public	2	2
Programmes d'éducation et de formation	2	2

4.2.5.3 Qui perd, qui gagne dans les scénarios Chronos ?

Les politiques publiques menées dans le scénario Chronos vont faire porter la moitié de l'effort sur les constructeurs automobiles, la moitié sur les transporteurs et les filières industrielles impliquées dans la construction ferroviaire.

En pénalisant fiscalement les émissions de CO2, les pouvoirs publics vont inciter les constructeurs à un effort d'innovation continu, dont les effets seront, comme pour Pégase, de deux types opposés :

- d'un côté, il faut s'attendre à des hausses significatives des coûts de production des véhicules, et donc des prix de vente, dont les conséquences sur les conditions de concurrence entre constructeurs dépendront étroitement de leurs positionnements en structure de gamme ;
- en revanche, le processus d'innovation devrait conférer un avantage comparatif à long terme à l'ensemble de ces constructeurs, sur les marchés émergents notamment, du fait de la globalité des contraintes provenant des ressources pétrolières et du changement climatique.

De même, du fait de la tarification des infrastructures et de la fiscalité carbone, les pouvoirs publics vont rendre les conditions d'exploitation des transporteurs routiers de plus en plus difficiles par rapport aux transporteurs ferroviaires, lesquels seront en tout état de cause beaucoup moins affectés (ils paient déjà une partie significative de l'utilisation des infrastructures, et leur intensité CO2 est en tout état de cause beaucoup plus faible).

Enfin, le développement considérable des infrastructures ferroviaires, notamment rapides, visé dans ce scénario devrait donner un énorme stimulus à l'activité de tous les acteurs présents dans la filière, depuis les sociétés de génie civil aux équipementiers en passant par les logisticiens et les offreurs de services transport.

Le tableau ci-dessous donne une vision quantifiée des impacts relatifs des mesures de politiques publiques sur les grands acteurs industriels, selon les conventions exposées plus haut.

Il ressort de ce tableau un impact négatif beaucoup plus fort sur les acteurs comparé à Pégase (le double), avec un risque accru de baisse de la contribution relative de l'ensemble de ces acteurs au PIB. Ce qui implique que ce scénario sera plus difficile à mettre en œuvre que Pégase, avec une acceptabilité moindre de la part des acteurs économiques.

Tableau 24 : Qui perd, qui gagne, dans Chronos

MESURES	Fabricants automobiles et sous-1traitants	Fabricants d'équipement électriques et électroniques	Producteurs de biens intermédiaires pour le transport	Autres fabricants fournisseurs des transports	Companies ferroviaires	Transporteurs routiers	Companies de transports publics urbains	Companies d'autocars	Autres producteurs de services de transport	Garagistes	Compagnies de télécommunication	Compagnies offrant d'autres services au transport	Raffineurs et distributeurs pétroliers	Compagnies électriques	Compagnies gazières	Agriculteurs	Ensemble
Prix et taxes																	
Taxe CO2 (TGAP)	-549	50	0	36	347	-357	59	-235	-92	-123	10	-10	-706	46	-34	84	-1473
Taxation des camions à la tonne-km	-216	45	5	42	156	-390	14	-36	59	-18	0	18	0	5	0	0	-318
Péages routiers pour les maxicodes	-216	63	5	42	156	-390	14	-36	59	-18	5	33	-156	24	0	0	-417
Subventions au transport multi-modal	-144	111	14	60	594	-480	41	-72	63	-54	0	27	0	18	0	0	177
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	38	-7	2	-4	-22	90	-70	-43	-11	14	0	-2	14	-4	18	0	15
Réduction des taxes et subventions sur les ENR	0	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19	-2	-2	72	41
Subventions au véhicule electrique	0	140	0	-2	-7	0	-36	-7	0	7	0	-2	-62	38	0	0	70
Subventions au véhicule urbain	72	-4	2	-2	-14	0	-23	-14	-5	14	0	0	7	-2	0	0	31
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	-12	108	-6	-15	-56	160	0	36	-21	0	0	-12	-152	16	10	0	56
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	-84	108	-6	-15	-56	30	-60	24	-12	24	0	-12	-176	13	10	0	-212
Vignettes variables en fonction des taux d'émission	-180	48	-5	0	18	0	14	18	14	-18	0	-5	-228	20	15	0	-290
Péage sur les voies urbaines rapides	-155	38	-3	14	76	-180	130	-40	32	-90	9	11	-101	11	3	0	-246
Péage sur les artères urbaines	-112	22	-3	5	43	-90	92	-14	16	-79	9	5	-79	8	3	0	-174
Péage sur les autoroutes	-276	54	0	27	228	-390	-14	-312	86	-114	15	14	-150	9	5	0	-819
Incitations/taxation usage des VP des employés	-68	16	-3	3	32	0	81	32	0	-90	9	5	-58	11	3	0	-26
Réglementation																	
Normes CO2 pour les VP	-499	125	-5	30	83	-48	106	83	48	-141	0	5	-218	54	-11	32	-355
Renforcement des limites de vitesse	-298	29	0	36	154	-192	22	-125	115	-154	0	14	-58	7	0	0	-449
Contrôle plus strict des vitesses et tremps de conduite des PL	-269	86	7	58	499	-1044	65	-58	94	-86	0	29	-58	14	0	0	-662
Organisation du transport au niveauEuropéen	-54	22	3	5	68	-45	0	-36	-19	-11	0	3	-32	3	0	0	-94
Harmonisation des réglementations nationales pour le rail	-108	111	5	18	288	-98	32	-78	0	-54	20	29	-132	33	0	0	65
Investissements, aménagement																	
Extension des infrastructures pour le fret et les passagers	-204	75	5	18	630	-98	72	-42	-32	-132	0	9	-72	18	0	0	248
Extension des infrastructures TGV	-112	44	3	3	420	0	48	-16	-60	-88	0	0	-48	12	0	0	206
Extension du réseau multi-modal route/fer, route/VE	-186	75	5	23	360	-143	27	-54	32	-132	20	29	-36	14	0	0	32
Meilleur service et logistique pour le rail fret	-48	30	6	15	184	-80	18	-24	-9	-24	0	9	-12	6	0	0	71
Priorités aux véhicules de transport public	0	18	0	9	36	0	180	36	0	-36	0	9	0	9	0	0	261
Financement des extensions de transports régionaux rapides	-68	23	0	5	115	-14	43	11	0	-68	0	3	-11	8	0	0	48
Accroissement des fréquences, extension des dessertes	-68	23	0	5	58	-14	86	11	0	-68	0	3	-11	8	0	0	33
Extension du stationnement payant	-68	11	-3	0	22	0	54	22	0	-79	12	12	-22	5	0	0	-35
Fixation d'un prix minimum du stationnement	-11	16	0	0	0	0	19	0	-8	-22	12	12	-11	3	0	0	10
Réduction des espaces habilités au stationnement	-96	57	0	5	78	-23	117	78	-27	-150	20	24	-18	18	0	0	83
Amélioration des pistes cyclables et autres voies piétonnières	-11	0	0	6	-11	0	-27	-11	0	11	3	6	11	-3	0	0	-25
Centre-villes sans voiture	-18	36	0	5	18	0	77	18	-14	-54	20	24	-18	9	0	0	102
Extension des zones urbaines limitées à 30km/h	-18	27	0	0	0	0	32	0	-14	-36	20	20	-18	5	0	0	17
Plan de Déplacement Urbain pour les villes > 100 000 h	-68	11	-3	0	22	0	54	22	0	-79	12	12	-22	5	0	0	-35
Autres																	
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	0	7	0	4	14	0	36	14	0	-14	0	4	-24	5	2	24	72
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	-184	30	-6	0	24	0	39	24	9	-48	13	7	-200	13	10	0	-269
Programmes nationaux d'information du grand public	-14	18	2	4	24	-9	18	-7	-11	-22	6	4	-7	4	0	0	8
Programmes d'éducation et de formation	-14	18	2	4	24	-9	18	-7	-11	-22	6	4	-7	4	0	0	8
Ensemble du programme	**-4319**	**1678**	**21**	**444**	**4605**	**-3811**	**1373**	**-839**	**280**	**-2054**	**217**	**338**	**-2888**	**465**	**30**	**212**	**-4247**

4.2.5.4 Comment évoluent les prix et les coûts du transport dans les scénarios Chronos ?

L'effet majeur des mesures de politique publique dans Chronos est de peser sur l'ensemble des prix et coûts impliqués dans le transport routier : coût des véhicules, coût d'usage des infrastructures routières, y compris urbaines, fiscalité carbone sur les carburants.
L'autre effet important est le renchérissement du transport aérien par le biais de la fiscalité carbone.

Bien sûr, la diminution des consommations unitaires de produits pétroliers des véhicules routiers résultant des progrès technologiques et des substitutions vers les biocarburants et l'électricité, viendra contrebalancer en partie le surcoût des véhicules.

On peut valablement considérer que le surcoût des véhicules dû aux évolutions technologiques sera, pour les consommateurs finals, globalement compensé par les économies sur les carburants, lesquelles seront d'autant plus forte que la taxe carbone sera plus élevée, faute de quoi il n'y aurait pas de marché pour ces véhicules. Pour autant, il n'en reste pas moins que l'ensemble du coût (acquisition + fonctionnement) sera appelé à croître, à un rythme plus rapide que celui de la croissance des revenus, le maintien du coefficient budgétaire résultant alors de la substitution vers les transports collectifs terrestres et les modes doux.

Pour le transport de marchandises, la tarification des infrastructures et la taxe carbone auront un double effet :

- entraîner le coût du transport routier à la hausse, en particulier sur la longue distance où la réduction des consommations de carburant sera moindre ;
- entraîner le coût moyen du transport également à la hausse, le recours accru au transport ferroviaire ne compensant pas intégralement, loin s'en faut, le surcoût du transport routier.

Le tableau ci-dessous donne une vision quantifiée des impacts relatifs des mesures de politiques publiques sur les grands postes de coût des transports, selon les conventions exposées plus haut. Il en ressort une forte probabilité que ce scénario conduise à une hausse du coût moyen de transport, notamment par rapport à Pégase.

Tableau 25 : Quelles évolutions des coûts de transport dans Chronos

MESURES	Prix d'achat des voitures	Prix d'achat des VUL	Coût d'usage de la voiture	Coût d'usage du VUL	Prix du billet de train	Prix du billet de transp. public	Prix du billet d'autocar	Prix du billet d'avion	Prix du transport routier de fret	Prix du transport de fret par rail	Prix du transport de fret par VE	**Ensemble**
Prix et taxes												
Taxe CO2 (TGAP)	28	42	420	336	28	112	112	168	280	42	56	1624
Taxation des camions à la tonne-km	0	0	0	0	0	0	0	0	300	0	0	300
Péages routiers pour les maxicodes	0	0	0	0	0	0	0	0	300	0	0	300
Subventions au transport multi-modal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-45	-15	-60
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	0	0	-90	-72	0	-12	-12	0	-60	0	0	-246
Subventions au véhicule electrique	-24	-36	-60	-48	0	12	0	0	0	0	0	-156
Subventions au véhicule urbain	-24	-18	-30	-24	0	12	0	0	0	0	0	-84
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	0	0	0	0	0	-40	-40	0	-100	0	0	-180
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	-40	-60	-100	-80	0	0	0	0	0	0	0	-280
Vignettes variables en fonction des taux d'émission	30	45	-75	-60	0	0	0	0	0	0	0	-60
Péage sur les voies urbaines rapides	0	0	180	144	0	0	36	0	90	0	0	450
Péage sur les artères urbaines	0	0	180	144	0	0	0	0	0	0	0	324
Péage sur les autoroutes	0	0	300	240	0	0	60	0	150	0	0	750
Incitations/ taxation usage des VP des employés	0	0	90	0	-18	-18	0	0	0	0	0	54
Réglementation												
Normes CO2 pour les VP	96	144	-480	-384	0	0	0	0	0	0	0	-624
Renforcement des limites de vitesse	0	0	-120	-96	0	0	48	0	120	0	0	-48
Contrôle plus strict des vitesses et tremps de conduite des PL	0	0	0	0	0	0	0	0	480	0	0	480
Organisation du transport au niveauEuropéen	0	0	0	0	-18	0	0	0	0	-27	0	-45
Harmonisation des réglementations nationales pour le rail	0	0	0	0	-30	0	0	0	0	-45	-15	-90
Investissements, aménagement												
Extension des infrastructures pour le fret et les passagers	0	0	0	0	30	0	0	0	0	45	0	75
Extension des infrastructures TGV	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Extension du réseau multi-1modal route/ fer, route/ VE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-45	-15	-60
Meilleur service et logistique pour le rail fret	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	60
Priorités aux véhicules de transport public	0	0	0	0	0	-30	0	0	0	0	0	-30
Financement des extensions de transports régionaux rapides	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	18
Accroissement des fréquences, extension des dessertes	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	36
Extension du stationnement payant	0	0	45	36	0	0	0	0	0	0	0	81
Fixation d'un prix minimum du stationnement	0	0	45	36	0	0	0	0	0	0	0	81
Réduction des espaces habilités au stationnement	0	0	75	60	0	0	0	0	0	0	0	135
Plan de Déplacement Urbain pour les villes > 100 000 h	0	0	0	0	0	-18	0	0	0	0	0	-18
Autres												
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	0	0	-70	-56	0	-28	-28	0	-70	0	0	-252
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	0	0	0	0	0	-12	0	0	0	0	0	-12
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	60	90	-300	-240	0	0	0	0	0	0	0	-390
Programmes nationaux d'information du grand public	0	0	-30	-24	0	0	0	0	0	0	0	-54
Programmes d'éducation et de formation	0	0	-30	-24	0	0	0	0	0	0	0	-54
Ensemble du programme	**126**	**207**	**-50**	**-112**	**12**	**32**	**176**	**168**	**1490**	**-15**	**11**	**2045**

4.2.5.5 Synthèse de l'évaluation des politiques publiques au regard de la mobilité durable dans les scénarios Chronos

Le tableau ci-dessous résume les impacts que l'on peut attendre des politiques publiques dans les scénarios Chronos, selon les grands critères retenus dans cette procédure d'évaluation multicritères (cf. méthode exposée plus haut). On rappelle que les chiffres rassemblés dans ce tableau n'ont pas de valeur intrinsèque, mais indiquent la direction et la force relative des impacts selon les critères retenus. Ils indiquent néanmoins une plus forte probabilité d'atteindre les objectifs F4 de par la pluralité des moyens employés, mais avec une plus grande difficulté de mise en œuvre du fait d'une faible acceptabilité sociale, économique et politique.

Tableau 26 : Synthèse des impacts des politiques publiques dans Chronos

Impacts	CHRONOS	CHRONOS TGV
Acteurs	-4247	-4845
Prix/coûts	2045	2897
Objectifs TEV	11692	12861
technologie	2941	3214
demande	8751	9647

4.3 Hestia : La redécouverte, choisie ou contrainte, de la proximité

Hestia : quand la proximité dévoile à son tour ses charmes

Fille de Cronos et de Rhéa, Hestia ne joue pas dans la mythologie grecque un rôle aussi important qu'Athéna. Elle n'est ni combattante, ni violente, déesse du foyer, elle incarne les valeurs de la proximité et de la chaleur des relations entre membres d'une même famille, d'un même quartier. A ce titre, elle offre un havre de paix à ceux que l'hypermobilité a fini par lasser. Bien sûr, cela se paie par un nombre restreint de relations sociales, une vie sans histoire, comme les peuples heureux, ceux qui justement n'ont pas d'histoire.

4.3.1. Fils directeurs des scénarios de la famille Hestia

Hestia: des changements radicaux dans l'organisation de la production et de la consommation ainsi que dans les modes de vie, accompagnés par des politiques publiques a*d hoc*.

4.3.1.1 Rappel des contraintes, variables et indicateurs de mobilité des scénarios Hestia

Contraintes et tendances structurelles	→ **Variables** →	**Indicateurs de mobilité**
- **Les tendances démo-économiques** Croissance économique Vieillissement Hausse des prix du pétrole	- **L'état des technologies** Motorisation VP et PL - MCI - Hybrides… - Biocarburants - PAC Technologies aériennes - **Les modes de vie** Arrêt de la hausse des BTT Coefficients budgétaires stabilisés pour les dépenses de mobilité Localisation des ménages revues et adoption de programmes d'activités moins gourmands en mobilité. - **L'organisation de la production et de la consommation** Délocalisation des entreprises et globalisation remise en cause pour certains biens et services Hausse forte du coût relatif du transport Offre commerciale (biens et services) revue en faveur de la proximité. - **Les politiques publiques** Contraintes fortes sur la vitesse et les usages de la route Développement des péages Taxes carbones Marchés de permis négociables Aides à la recherche	**Indicateurs « Transport »** distance PK/an parts modales en urbain, régional et grande distance distance KM/tonne élasticité vitesse/PIB voyageurs et marchandises Km annuel en VP Consommation de carburants **Indicateurs « Environnement »** **Emissions de CO2**

Scénario Hestia : maîtrise des quantités, maîtrise de l'espace

Atteinte du facteur 4 par mécanismes de quotas et de permis négociables qui imposent de nouveaux arbitrages sur les localisations des ménages et des activités dans le sens d'une réduction des distances de parcours.

> Contexte et sentier technologique raisonnable identiques à Pégase

> Hypothèses structurantes
- Maintien de l'hypothèse de Chronos sur le découplage vitesse moyenne globale *vs* PIB et vitesse moyenne des VP.
- Réduction des distances de parcours pour les différents services de transport (passagers et marchandises).
- Retour à un BTT constant identique à Pégase.

4.3.1.2 Hestia : repenser la ville et les loisirs pour épargner le temps

Fille de Chronos, Hestia en garde les attributs au regard de la vitesse et des coûts de transport. Mais la réaction du système économique et social y est différente, la compensation de la perte de vitesses se faisant non plus par l'allongement du temps consacré au transport, mais par les localisations et les distances, bref par l'aménagement de l'espace.

Agir sur les distances par une diminution des Vkm (soit une densification du système productif ainsi que du système de distribution et du système socio-spatial) tout en maîtrisant la vitesse, tel est l'enjeu majeur des politiques publiques dans Hestia.

Déplacements urbains et régionaux

Les conséquences principales que l'on peut attendre d'actions publiques visant à la fois à maîtriser les vitesses et les distances des déplacements urbains et régionaux des personnes sont les suivantes :

> les btt stagnent, les gens compensent les baisses de vitesses par des baisses de kilométrages. Globalement la mobilité individuelle (km/an/pers) stagne.

> la distance moyenne de trajet baissant, la voiture résiste mieux au transport collectif et sa vitesse baisse moins vite.

> l'augmentation de la fréquence des TC étant moindre, leur vitesse moyenne baisse moins vite.

> les gens n'acceptent pas de passer plus de temps dans les transports car l'utilité du temps reste faible (trajet cours).

> la généralisation de l'hybride rechargeable fait que l'autonomie des voitures en mode électrique est plus facilement compatible avec les distances et les temps de déplacements.

Déplacements longue distance (>150 km)

Pour les déplacements de longue distance, les principales conséquences que l'on peut attendre sont les suivantes :

> pas d'influence sur le BTT longue distance.

> l'offre de TGV et la tarification du transport aérien induisent un double report de la voiture vers le TGV, de l'avion vers le TGV.

L'attribution de quotas individuels CO2 entraîne un report du trafic VP et du trafic aérien sur le trafic ferroviaire.

4.3.1.3 Repenser l'organisation de la production et les localisations pour minimiser les temps d'acheminement avec des vitesses contraintes

Si nous supposons une contrainte sur la capacité à payer plus de vitesse (par exemple, payer des envois via transport aérien) et nous supposons une forte hausse du coût du transport, le système de transport pourrait être amené à changer sa structure productive en tirant sur les distances parcourues par les marchandises.

Autrement dit, nous pouvons supposer que le système productif s'adaptera à un coût du transport relativement élevé et que, dans un souci de minimisation des coûts, il cherchera à se décentraliser en maximisant son profit.

Il semblerait que la suite logique à une adaptation du système par le temps de transport pourrait être une adaptation par les distances. Une fois le coût du transport devenu trop onéreux, les entreprises seraient amenées à décentraliser toute une série d'activités afin de proposer des services de proximité. En effet, une fois le seuil du supportable de disposition à payer d'une entreprise, elle préférera s'approcher de son aire de marché que de continuer à transporter à des prix exorbitants. L'entreprise devra en suite choisir si les marchés des quels elle pourrait se retirer sont suffisamment rentables pour garder une présence, cette fois pas seulement de distribution mais aussi de production, ou si elle se retire complètement de ce marché pour se concentrer sur d'autres plus rentables et elle laisse ce marché ouvert à d'autre entreprises qui pourraient éventuellement prendre le relais.

Dans la logique d'Hestia, l'arbitrage se joue non-seulement sur les politiques publiques incitant des modes plus propres mais aussi sur l'implantation spatiale des activités et l'organisation de la production et de la consommation. Dans l'étude réalisée par Mc Kinnon sur le découplage anglais, un certain nombre d'arbitrages sont présentés, dont certains sont dans l'esprit d'Hestia.

Découplage relatif du fret routier

Pour McKinnon, un découplage spécifique aux modes a eu lieu en Angleterre et il a été causé par des changements dans la répartition modale du transport de fret. Ces changements ont été la conséquence d'une réduction dans le nombre de liens de la chaîne logistique. Certaines industries nationales ont été poussées à ne pas chercher un développement de leur chaîne logistique à cause du coût de transport, ou de leur dotation de moyenne en ressources (soit des ressources de production ou des transports –permis négociables).

Diminution de la Concentration Spatiale

Vers la fin des années 80 Quarmby explique qu'en améliorant les vitesses moyennes et la fiabilité du transport routier, les entreprises ont pu étendre leur aire de marché et desservir des clients lointains (Quarmby, 1989). Ainsi, ils ont pu modifier les arbitrages faits entre transport et autres coûts logistiques pour réduire le nombre optimal d'entrepôts requis pour desservir leurs marchés. A l'inverse, plus la congestion ou les temps de transport seront importants plus la concentration aura tendance à se renforcer.

C'est sur la base de ce raisonnement que McKinnon observe qu'en Angleterre : « *la concentration spatiale de l'activité économique a traditionnellement été un des principaux " drivers " de la croissance du fret routier. Le processus de concentration spatiale est maintenant relativement important et ne peut pas continuer de façon indéfinie. Eventuellement la production et la distribution deviendront des systèmes totalement centralisés mais ce processus peut être anéanti ou même renversé en augmentant la congestion sur le réseau routier* ».

Nous pourrions réfléchir à des politiques publiques qui puissent avoir une influence sur le coût d'immobilisation du transport des marchandises. Ce type de politiques pourrait avoir une influence importante sur l'arrêt de la concentration, notamment de la distribution et pourrait avoir des effets positifs sur la longueur des trajets ainsi que sur l'optimisation des livraisons et du taux de remplissage des véhicules.

Changements dans l'utilisation des véhicules

Cette contraction de l'aire de marché et la déconcentration du système distributif pourrait entraîner un changement non seulement dans le taux moyen de remplissage des poids lourds mais aussi dans l'utilisation des véhicules légers. Ce changement pourrait présenter, au moins dans les années à suivre, un avantage : étant donné qu'un des principaux problèmes des nouvelles technologies de motorisation est l'autonomie des véhicules, les nouvelles technologies pourraient être plus rapidement disponibles sur les VUL (sauf à connaître un développement très rapide des technologies motrices, ainsi qu'une pénétration très rapide de ces technologies sur les poids lourds).

Nous pouvons citer l'exemple du Canada qui planifie une pénétration relativement rapide des nouvelles technologies motrices sur les voitures personnelles et les VUL mais qui, en revanche, planifie l'intégration de nouvelles technologies sur les PL de manière ponctuelle par le " *retrofitting* " et ensuite une pénétration plus généralisée.

Diminution de la concentration spatiale

La concentration spatiale de l'activité économique a traditionnellement été un des principaux " drivers " de la croissance du fret routier. Le processus de concentration spatiale est maintenant relativement important et ne peut pas continuer de façon indéfinie. Eventuellement la production et la distribution deviendront des systèmes totalement centralisés mais ce processus peut être anéanti ou même renversé en augmentant la congestion sur le réseau routier.

En améliorant les vitesses moyennes et la fiabilité du transport routier, des entreprises ont pu étendre leur aire de marché et desservir des clients lointains (Quarmby, 1989). Ils ont pu modifier les (arbitrages) *trade-offs* faits entre transport et autres coûts logistiques pour réduire le nombre optimal d'entrepôts requis pour desservir leurs marchés. A l'inverse, plus la congestion ou les temps de transport seront importants plus la concentration aura tendance à se renforcer.

Des horaires stricts pour la livraison des marchandises en ville pourrait avoir une influence importante sur l'arrêt de la concentration, notamment de la distribution et pourrait avoir des effets positifs sur la longueur des trajets ainsi que sur l'optimisation des livraisons et du taux

de remplissage des véhicules. Ce qui a été le cas en Angleterre selon le rapport NAI Fuller Peiser de 2005.

En outre, le processus de déconcentration pourrait avoir des effets sur:

a) les changements dans l'efficacité des itinéraires des véhicules

b) la contraction des *supply chain links*, en aval aux producteurs et en amont aux consommateurs, soit la contraction de l'aire de marché.

Ces deux effets seront quantifiés dans les sections suivantes.

4.3.2. Les trafics voyageurs et les émissions de CO2 dans Hestia

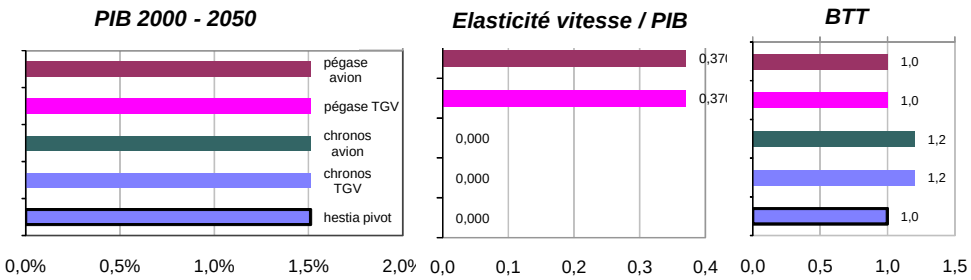
4.3.2.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Hestia

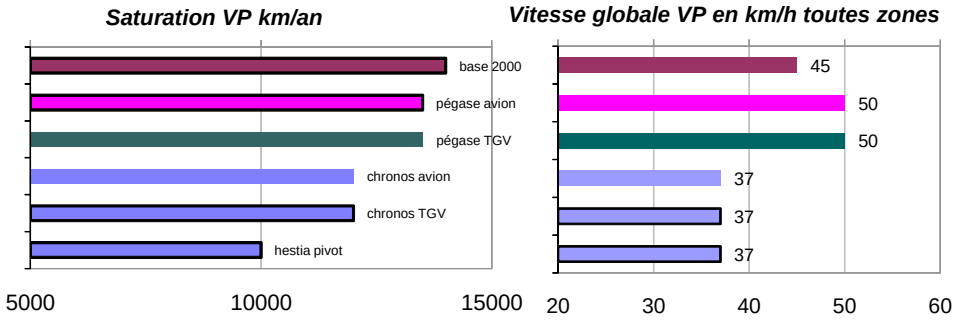
Le scénario Hestia ne comporte qu'une variante dont les hypothèses structurantes sont présentées dans les graphiques ci-dessous :

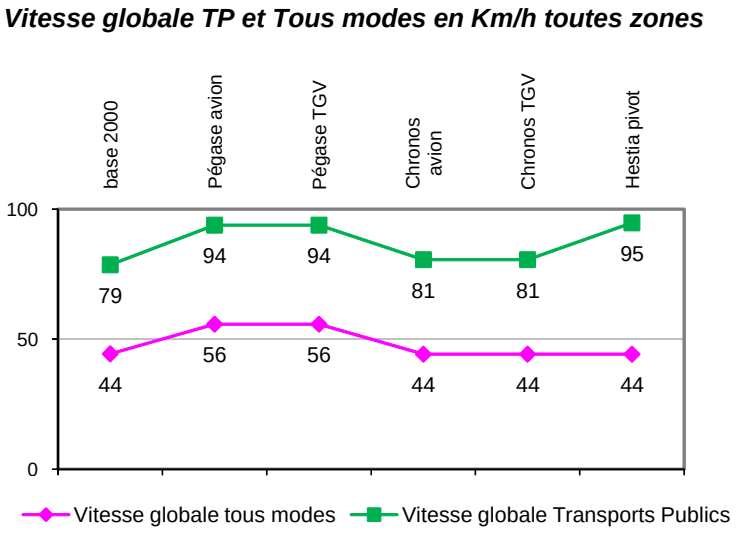
- le budget temps est recalé sur une heure (contre 1.2 heure dans Chronos et 1h00 dans Pégase)
- l'élasticité de la vitesse au pib est maintenue à 0 tout comme Chronos.
- le kilométrage annuel moyen des VP passe à 10 000 km en 2050, soit une baisse de 17% par rapport aux deux variantes de Chronos, de 26% par rapport à Pégase et de 29% par rapport à l'année de base.

La croissance du PIB et le niveau de population restent quant à eux identiques aux scénarios précédents. Compte-tenu de ces hypothèses, la vitesse moyenne de déplacement des personnes reste aux alentours de 44 km/h de 2000[29] à 2050, comme dans les scénarios Chronos. Par hypothèse, et pour rester en conformité avec l'esprit du scénario, qui rejoint sur ce point les scénarios Chronos, la vitesse moyenne des VP sur l'ensemble des zones doit baisser de 6km/h, et passe ainsi de 43km/h en 2000 à 37 km/h en 2050 (baisse de 14%).
En conséquence, compte-tenu de la circulation et de la vitesse moyennes des VP, TILT calcule que la vitesse moyenne des transports collectifs doit passer de 79km/h en 2000 à 95 km/h en 2050 pour assurer la stabilité de la vitesse moyenne des déplacements avec un btt constant (contre 81 km/h dans Chronos).

[29] La vitesse moyenne 2000 résulte du rapport entre le trafic global observé et le volume d'heures de déplacement pour une budget temps moyen d'une heure par jour et par personne ; elle correspond à des vitesses conventionnelles par mode cohérentes avec la vitesse moyenne globale et les parts modales.







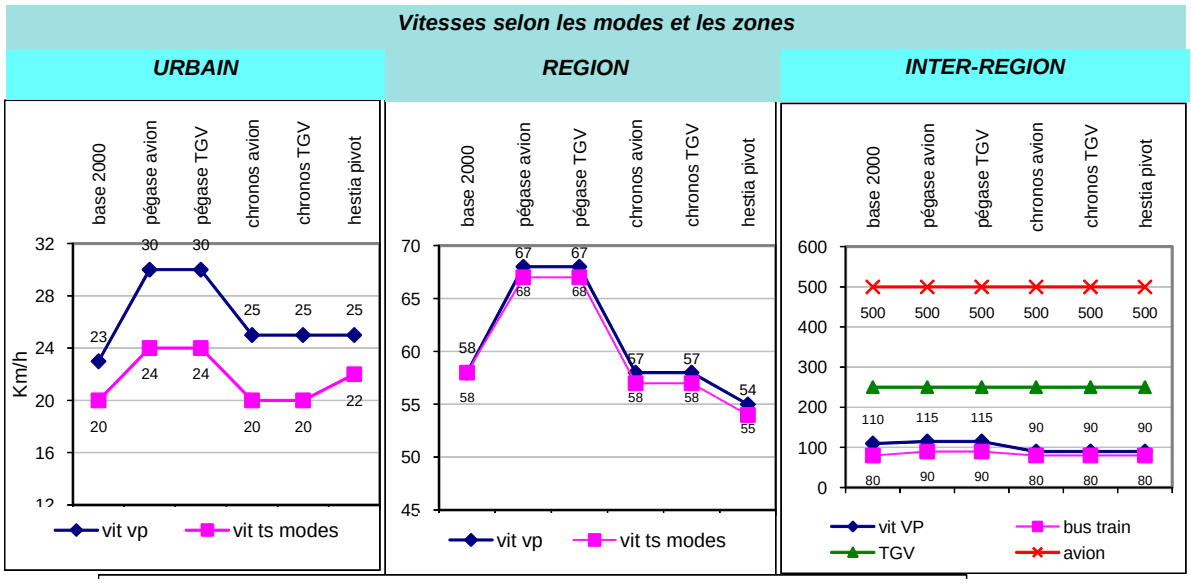
- en urbain, la vitesse VP est stabilisé à 25 km/h soit au même niveau que Chronos et 8% au dessus l'année de base. En revanche, la vitesse des modes collectifs dans Hestia progresse par rapport à Chronos et par rapport à l'année de référence avec une progression de 20 à 22 km/h. La vitesse des TC en urbain dans Hestia reste toutefois 8% en dessous de celle de Pégase.

- en région, par rapport à l'ensemble des scénarios et l'année de référence, Hestia introduit les vitesses VP les plus basses. Par rapport à l'année de référence, la vitesse VP en région dans Hestia est inférieure de 5% (55 km/h contre 58 km/h), celle de l'ensemble des modes baisse de 7% (54 km/h contre 58km/h).

- en longue distance, Hestia n'introduit pas de différences de vitesses par rapport à Chronos en maintenant des baisses marquées des vitesses automobiles sur autoroute (-20% par rapport à l'année de base et -18% par rapport aux variantes Pégase).

Les graphiques ci-dessous détaillent plus en avant les différentes hypothèses de vitesse réalisées selon les modes et les zones.

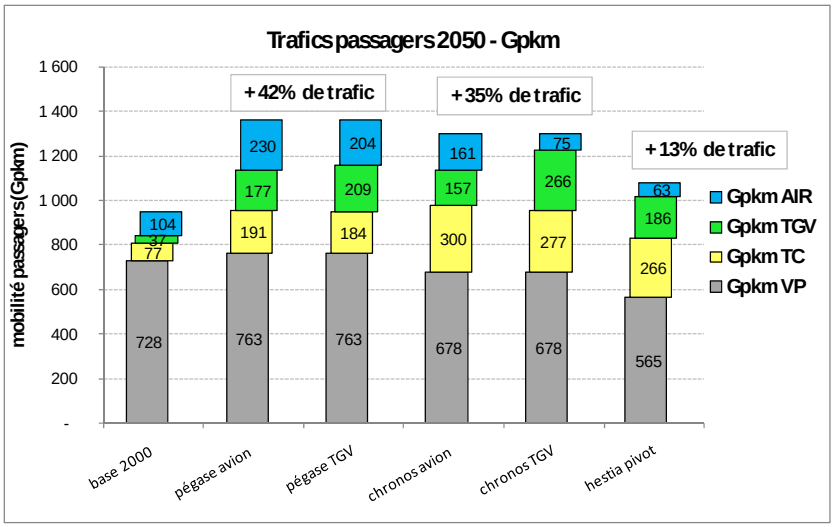
Figure 57 : Les vitesses de déplacement des passagers dans Hestia



4.3.2.2 Les projections de trafics dans les scénarios Hestia

Par rapport à l'année de base (2000), le scénario Hestia, correspond à une progression du trafic global passager de 13%. Ce scénario pourrait être vu sous l'angle de la « modération » et d'une certaine « maturité ». En effet, la progression de trafic est identique à celle de la population française de 2000 à 2050 (avec une projection INSEE à 67 millions d'habitants en 2050 aujourd'hui revu à 70 millions). Par conséquent, Hestia n'est pas un scénario de restriction ou de rationnement mais de maîtrise de la mobilité qui prend acte d'une part des goulots d'étranglement et logiques asymptotiques constatées aujourd'hui, d'autre part qui reste en phase avec les données démographiques et la structure démographique marquée par le vieillissement s'accompagnant généralement d'une moindre mobilité.

Figure 58 : Les trafics passagers par mode dans Hestia



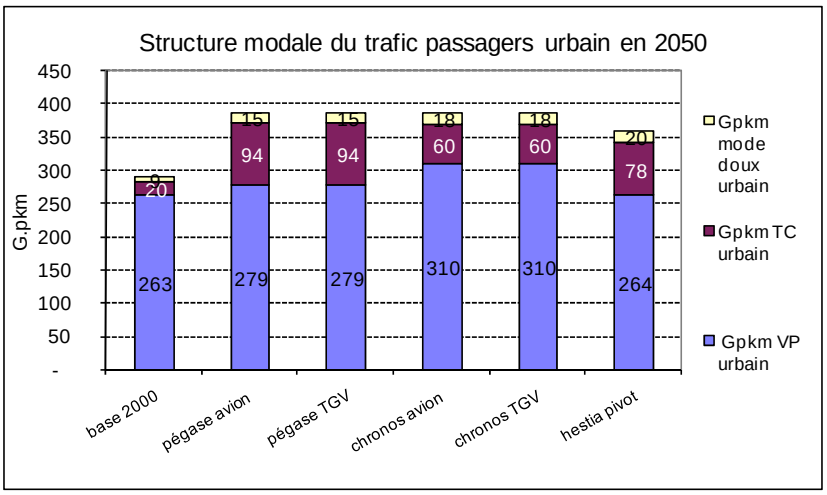
A partir des enseignements de Chronos avion pour atteindre le facteur 4, le scénario Hestia freine les progressions sur les modes les plus émetteurs de CO2 :

- par rapport à l'année de base, le trafic VP progresse seulement en région, terrain sur lequel la VP se situe sur « son cœur de métier » en assurant vitesse et isotropie.

- le trafic aérien se recentre sur la très longue distance et reste à son niveau d'année de base. Le niveau du trafic aérien de 63 Gpkm revient plus ou moins à un maintien légèrement en deçà du niveau de 2000 (77 Gpkm) pour la seule très longue distance (hors Europe). Le TGV assure dans ce cas l'ensemble des trajets longue distance nationaux et européens.

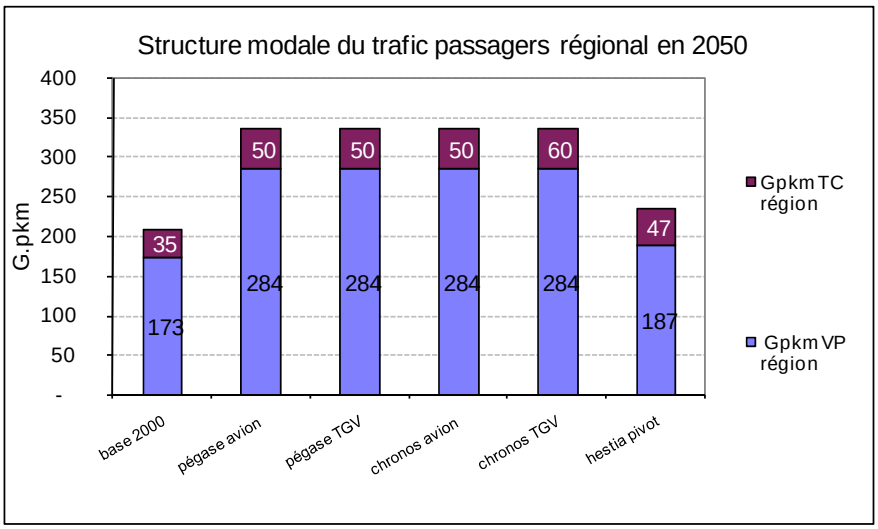
En urbain, le volume global de trafic augmente de 28% par rapport à l'année de base mais reste en deçà des progressions de trafics enregistrées dans Pégase et Chronos. A la différence des scénarios précédents, le trafic VP reste à son niveau de 2000 et l'essentiel de la progression s'effectue sur les Transports collectifs.

Figure 59 : Les trafics urbains de passagers par mode dans Hestia



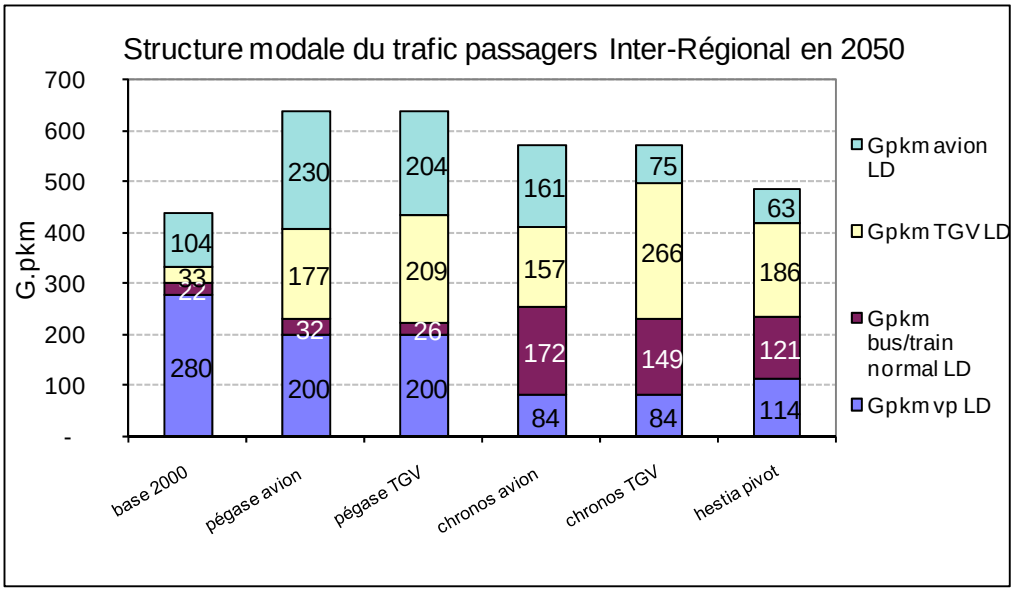
Pour les déplacements régionaux, la mobilité progresse de 13% par rapport à l'année de base (en phase avec la population), le trafic VP augmente de 8%, le trafic TC augmente de 34%.

Figure 60 : Les trafics régionaux de passagers par mode dans Hestia



Pour les déplacements longue distance supérieurs à 150 km, la mobilité totale progresse de 34% par rapport à l'année de base. Les modes collectifs (TGV, et train conventionnel) connaissent de fortes progressions mais à des niveaux moindre que dans Chronos (-18% pour le trafic du train conventionnel par rapport à Chronos TGV, et -30% pour le trafic TGV).

Figure 61 : Les trafics régionaux de passagers par mode dans Hestia

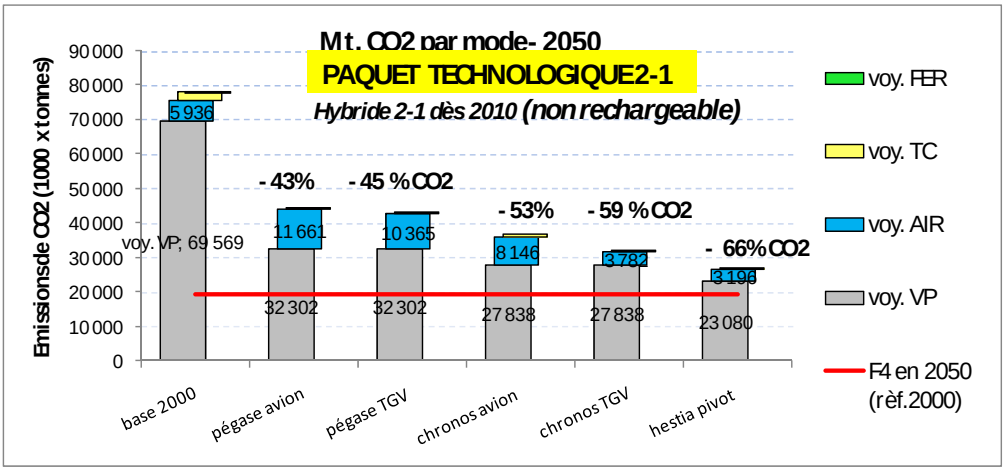


4.3.2.3 Les projections d'émissions directes de CO2 dans les scénarios Hestia, transport de passagers

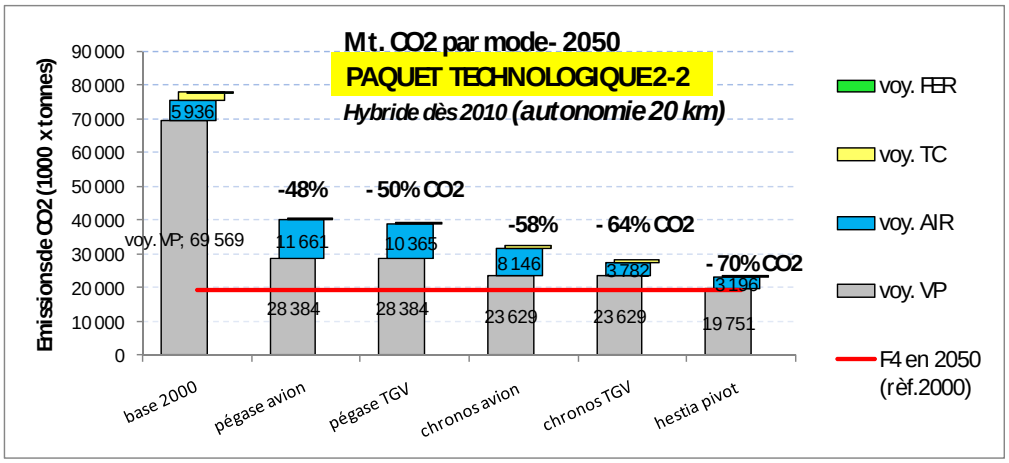
De la même manière que pour les scénarios précédents, Hestia est couplé aux quatre paquets technologiques préalablement définis.

Le paquet 2-1 met tout de suite en évidence la réduction significative des émissions liées à l'aérien. (12% du total contre 26% dans Pégase avion et 22% dans Chronos avion). Sans pour autant atteindre le facteur 4, le premier paquet technologique produit une baisse d'emblée significative des émissions directes de CO2 sur les passagers de 66% par rapport à l'année de référence soit 7 points de mieux que Chronos avion et 23 points de mieux que Pégase avion.

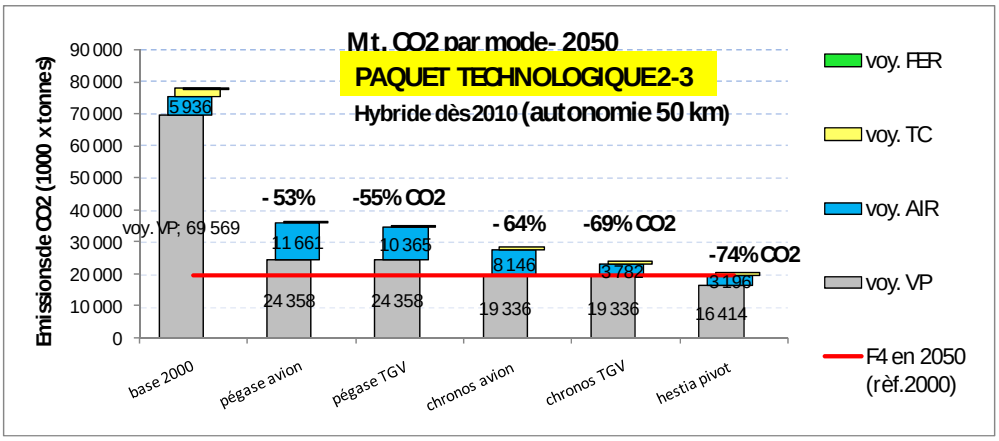
Figure 62 : Les émissions de CO2 du transport de passagers dans Hestia

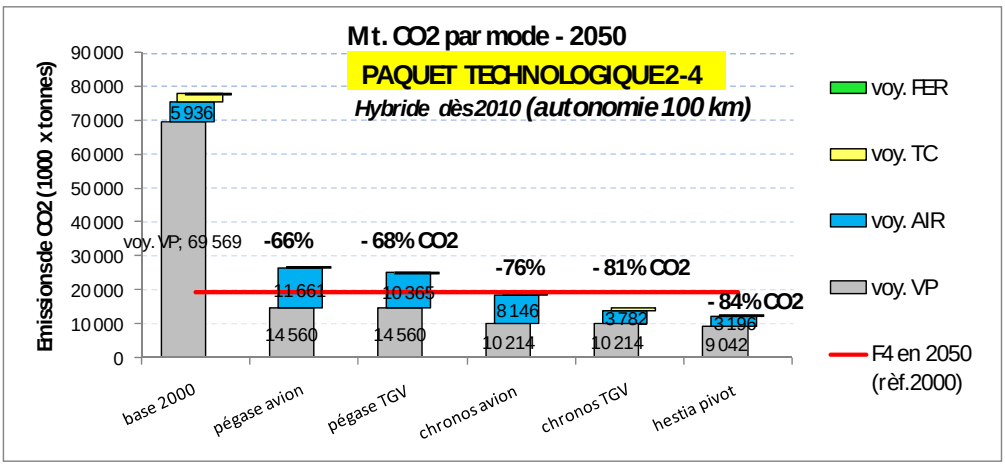


Avec le paquet 2.2, la réduction des émissions directes de CO2 pour le transport de passagers atteint 70%, soit 6 points de mieux que la meilleure configuration de Chronos avec le même paquet technologique.



Le scénario Hestia est le seul scénario à atteindre quasiment le facteur 4 pour les passagers avec le paquet 2-3. Ce paquet technologique correspond à la commercialisation des véhicules hybrides rechargeables d'une autonomie de 50 km dès 2010. Couplé au paquet 2-4, le scénario Hestia dépasse l'objectif du facteur 4 de 10 points en réalisant une baisse de 84% des émissions sur les trafics passagers par rapport à l'année de référence. Dans cette configuration, les marges de manœuvres pour les marchandises sont significatives.

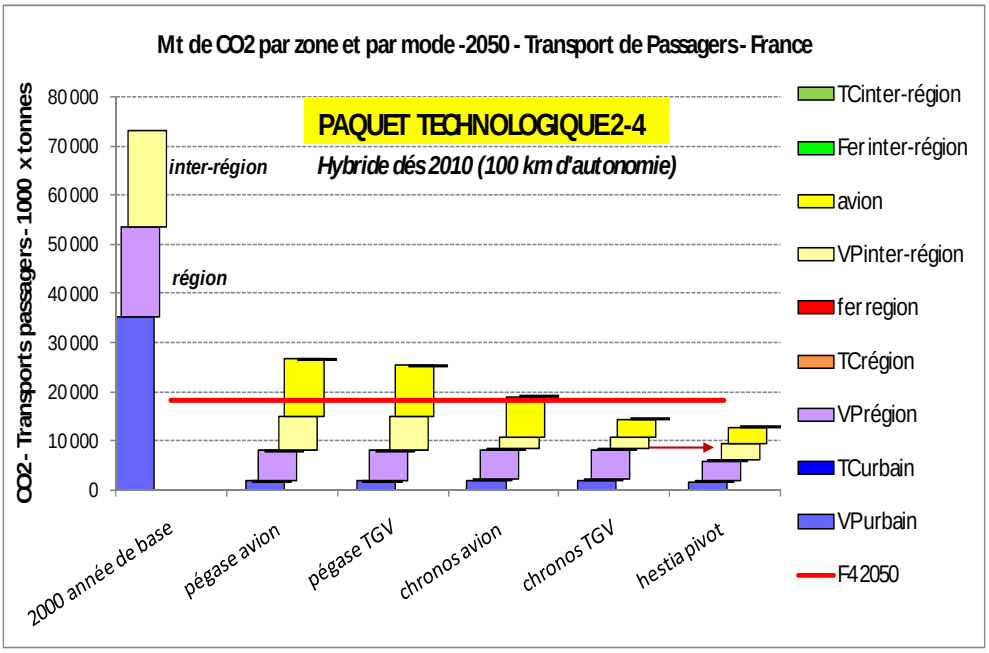




Il ressort de cela qu'il est possible d'atteindre le facteur 4 à l'horizon 2050 pour les trafics passagers en restant sur un sentier technologique tout à fait réaliste et avec une progression de la mobilité de 13% en phase avec les fondamentaux démographiques. Cette vision implique toutefois de maintenir le trafic avion à son niveau actuel en le recentrant sur les seuls déplacements très longue distance. Notons que l'évolution du contexte marqué par l'absence d'énergie de substitution à l'avion d'une part, le renchérissement des prix du kérosène d'autre part pourrait conduire à un tel arbitrage. Comme la plupart des autres scénarios, Hestia implique le développement massif des infrastructures ferroviaires à grande vitesse à l'échelle européenne afin de compenser le recul de l'avion sur ces destinations.

La figure ci-dessous met en lumière les gains marginaux réalisés par Hestia par rapport à Chronos selon les zones et les modes pour atteindre le facteur 4 :

Figure 63 : Les émissions de CO2 du transport de passagers par catégorie de services dans Hestia



La réduction la plus significative par rapport à Chronos porte sur la baisse des émissions de la VP en région (carré mauve).

La question demeure de savoir si le facteur 4 peut être atteint globalement par le scénario Hestia en intégrant les progressions de trafic des marchandises. Contrairement à la variante Chronos avion, Hestia couplé au paquet 2-4 laisse des degrés de liberté significatifs.

4.3.3. Les trafics marchandises et les émissions de CO2 dans Hestia

Le scénario Hestia remet en cause l'accroissement de la distance parcourue par les marchandises. Nous entrons dans une logique de rapprochement. Nous pourrions trouver une grande similitude entre le scénario Hestia et le scénario « Petites Europes » (vérifier si pluriel ou singulier) du rapport Prospective fret 2030, qui décrit une Europe polycentrique autour des grands bassins de vie. Dans Hestia, nous envisageons un système dans lequel il y a une organisation autour de la proximité.

4.3.3.1 La quantification des hypothèses structurantes des scénarios Hestia

Dans Hestia, nous retrouvons un effet cumulé des effets des politiques sur les vitesses du scénario Chronos et, nous avons un effet encore plus important sur la diminution du fret routier en jouant avec les distances parcourues.

Hypothèses sur le réaménagement spatial et la baisse des distances

La famille de scénarios Hestia introduit l'idée d'un système avec plus de services de proximité. Ainsi, alors que dans les familles Pégase et Chronos les distances parcourues connaissent une hausse tendancielle, Hestia connaît une hausse modérée et différenciée selon l'aire de service. Les distance parcourues pour le transport de marchandises en urbain et en régional augmentent plus vite que les distances parcourues pour le transport interrégional. En revanche, le nombre de tonnes transportées continue à connaître une hausse tendancielle.

Dans TILT, la logique d'Hestia conduit donc à une diminution de l'élasticité Tkm/Pib par rapport aux scénarios Pégase et Chronos. Cette notion est cohérente avec le fait que la déconcentration spatiale est hautement liée à une rupture du lien Tkm-Pib (McKinnon, 2007) . Afin d'être cohérent avec la logique d'une densification du centre, on a pris dans TILT des élasticités différences pour chaque zone de service : l'élasticité Tkm/Pib en urbain et régional augmente un peu (du fait de l'accroissement des Vkm et des tonnes transportées au centre et en région) et l'élasticité diminue en interrégional.

La différenciation des valeurs d'élasticité des Tkm/Pib traduit un système où une certaine préférence se manifeste pour la réduction des distances. Nous retrouvons une idée d'espace polycentrique fonctionnel dans l'organisation du système. La production, distribution et collecte sont organisées pour desservir des points de population denses, où les distances en urbain et régional diminuent, mais pas autant que sur la longue distance.

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 -du fait d'avoir un développement de centres denses- fait en sorte de garder un kilométrage total plus élevé que sur la longue distance (où la structure polycentrique fait diminuer fortement les kilométrages).

La baisse de l'élasticité Tkm/Pib sur l'ensemble du système suppose une réduction du nombre de liens de la chaîne logistique. Cette réduction est directement liée à l'organisation du système productif, de collecte et de distribution sur l'ensemble du territoire. Ceci aura aussi des impacts sur les services logistiques proposés et sur la logistique elle-même car ces effets ne seront pas seulement un impact sur l'organisation territoriale dans l'Hexagone, mais aussi sur l'organisation des itinéraires d'acheminement et les zones de chalandise propres au transport de marchandises.

On quantifie ces effets en les assimilant au retrait d'une infrastructure de transport. Cette disparition d'infrastructures conduit à une hausse du coût généralisé du transport qui incite les acteurs économiques à s'adapter en réduisant les distances parcoures par les tonnes nécessaires (car il n'y a pas une réduction de tonnes consommées au delà de la réduction

tendancielle due à l'allégement de la production et de la consommation) au bon fonctionnement de l'économie française.

Dans ce nouveau système, la hausse du coût du transport remet en partie en cause les gains liés au rendement d'échelle lié à la production sur un même site pour l'ensemble d'une zone économique. En même temps, du côté de la distribution et de la collecte de produits, le fait que les passagers demandent des services de proximité pour réduire eux mêmes leur kilométrage, fait que ces services retrouvent aussi un sens à se approcher de leur marché en optimisant les distances totales nécessaires à leur activité. De ce fait, certaines industries ainsi que la distribution, développent une organisation complètement différente pour être cohérente avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Mais il est nécessaire de souligner la situation de double contrainte dans laquelle se trouvent chargeurs et transporteurs. Alors même que le système les incite à réduire les distances, les ménages cherchent à bénéficier de livraisons à domicile ou dans des lieux spécifiques, poussant ainsi à la hausse du trafic routier local.

Hypothèses sur les vitesses

Comme dans les scénarios Chronos, nous considérons par hypothèse que l'élasticité vitesse/PIB est égale à 0 sur l'ensemble du territoire métropolitain. La vitesse moyenne de déplacement des marchandises est ainsi stabilisée à 43 km/h jusqu'en 2050[30] .
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 performant.
En considérant ainsi, comme dans les scénarios Chronos, que la croissance de la vitesse moyenne sur la route est limitée à 5%, de 50 km/h (2000) à 52 km/h en 2050, alors la vitesse moyenne du rail conventionnel et des modes rapides doit passer de 40 km/h (2000) à 45 km/h en 2050 pour conserver une vitesse moyenne de déplacement des marchandises constante (résultat identique à celui trouvé dans les scénarios Chronos).
Cette évolution n'est envisageable qu'au prix d'un développement significatif des modes rapides (ferroviaire rapide et aérien, vitesse moyenne prise par convention égale à 200km/h), la vitesse du transport ferroviaire conventionnel étant considérée constante sur l'ensemble de la période.
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 de marchandises sont moindres que dans les familles de scénarios Chronos et Pégase.

[30] Les vitesses indiquées ici correspondent à des variations des vitesses conventionnelles considérées pour l'année de base et n'ont de signification que par rapport à ces vitesses conventionnelles de l'année de base

Tableau 27 : Hypothèses utilisées dans le scénario Hestia, transport intérieur de marchandises

	2000	2050
Vitesse route-Intérieur	50 km/h	52 km/h
Vitesse du rail-Intérieur	40 km/h	40 km/h
Vitesse du rail et modes rapides	40 km/h	45 km/h
Vitesse du l'ensemble du transport Intérieur	43 km/h	43 km/h
Elasticité vitesse/PIB		0
Elasticité T.Km/GDP intérieur		0,33 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur		0,25

Le scénario Hestia ne suppose pas d'exclure l'import et l'export de marchandises de pays aussi lointains que variés, mais d'organiser différemment le système pour minimiser les distances parcourues sans compromettre la variété ainsi que la quantité de produits consommés et écoulés par la France.

Dans le modèle cette situation se traduit par une élasticité commerce extérieur/PIB de 0,36 sur l'Intra-européen ; de 0,6 sur l'Extra-Européen 25 et le reste du monde et avec une élasticité vitesse/PIB de 0,3. Ainsi, les besoins en vitesse pour le commerce extérieur continuent à croître de manière tendancielle, permettant d'exporter et importer les produits nécessaires de manière efficace sans perdre sur le plan logistique. En revanche, le commerce extérieur se fait à des distances plus courtes.

Tableau 28 : Hypothèses utilisées dans le scénario Hestia, transport international de marchandises

Vitesse route	52 km/h
Vitesse du rail	40 km/h
Vitesse du rail rapide	70 km/h
Vitesse du l'ensemble du transport Intérieur	52 km/h
Elasticité vitesse/PIB	0,3
Elasticité TKm/commerce extérieur Intra-Europe 25	0,36
Elasticité TKm/commerce extérieur Extra-Europe 25	0,6
Elasticité TKm/commerce extérieur Reste du Monde	0,6
Part de l'avion sur les modes rapides	40%

4.3.3.2 Les projections des trafics de marchandises dans les scénarios Hestia

Dans 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 à une part de marché plus importante que dans Chronos et connaît une croissance de 4% par rapport à 2000.

Pour équilibrer le système avec ces caractéristiques, nous avons rendu le système 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 distribution ainsi que de la logistique.

Sur la longue distance, nous retrouvons une répartition modale de : 63% par la route ; 30% par rail normal ; 2% par navigation intérieure et 5% sur rail rapide. Ceci 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.

Figure 64 : Trafic Marchandises dans Hestia

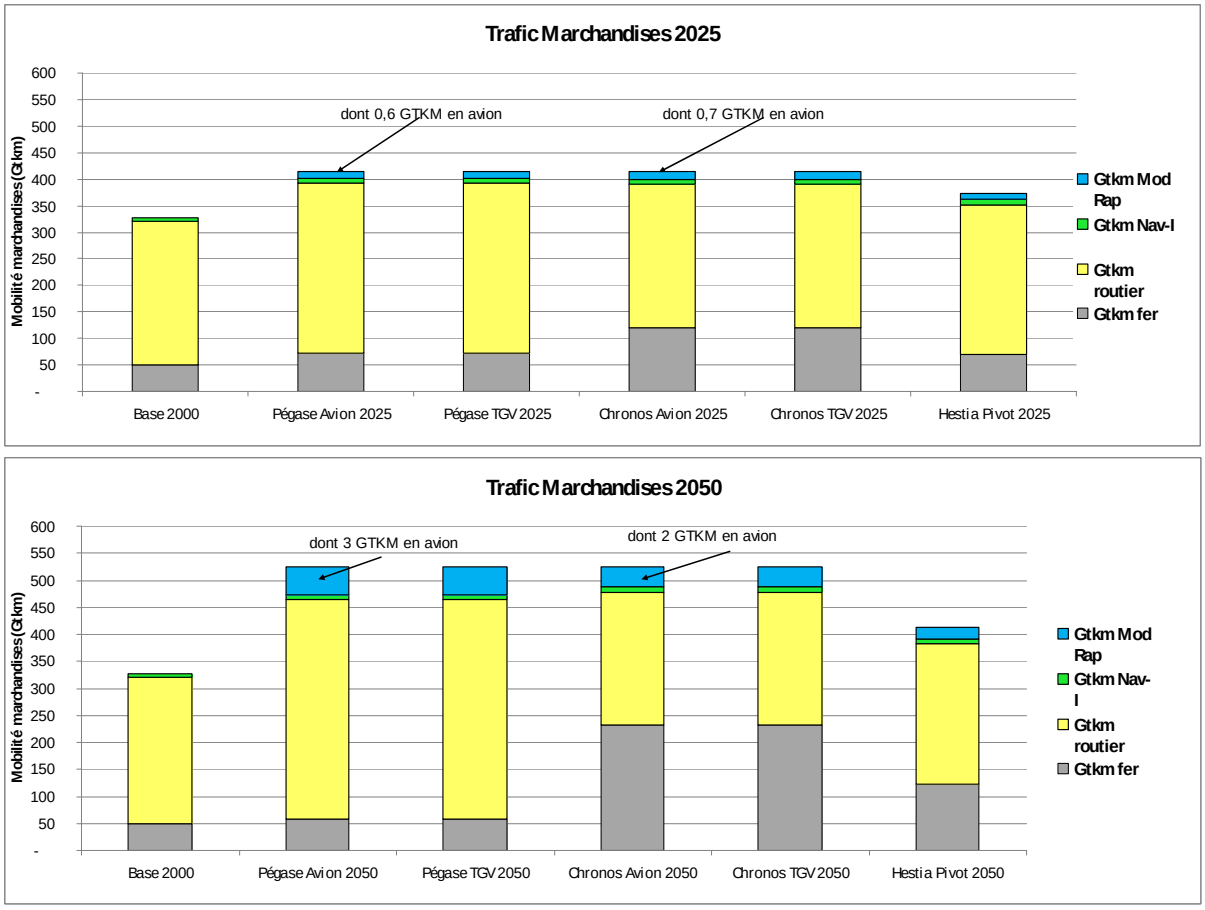


Figure 65 : Trafic des marchandises par mode et zone dans Hestia

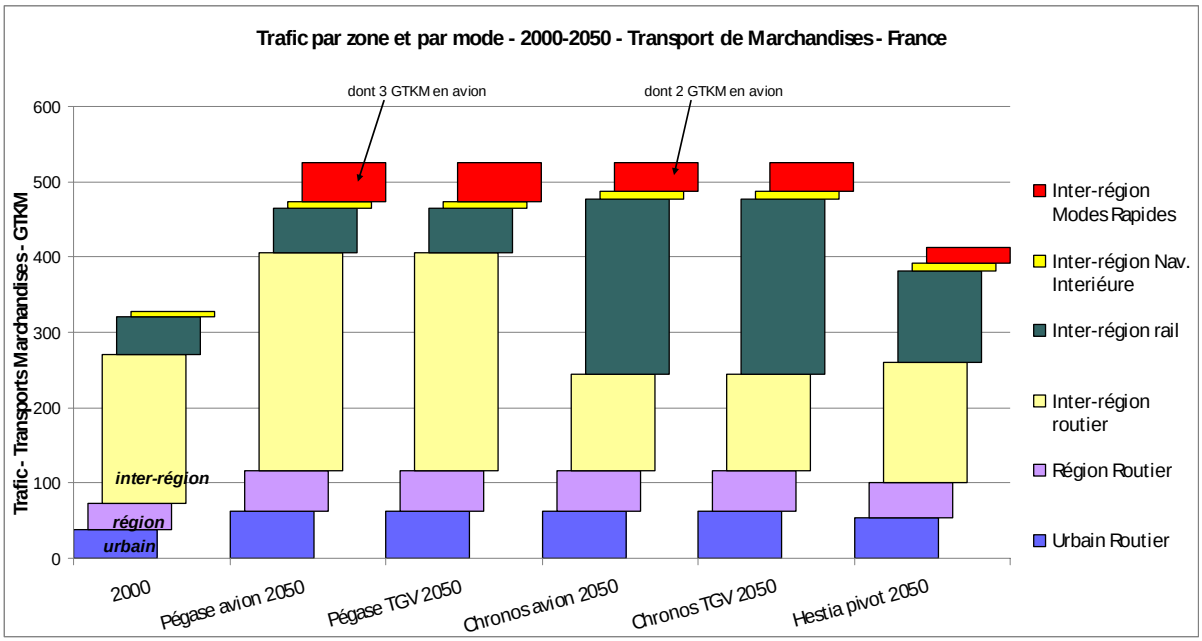


Tableau 29 : Trafic intérieur de marchandises dans Hestia

Trafic Intérieur
2000-2050

GTKM	2000	Hestia pivot 2050
URBAIN	39	54
REGION	34	47
INTER-REGION	254	312
Total	327	412
URBAIN		
Urbain Routier	39	54
REGION		
Région Routier	34	47
	0	0
	0	0
INTER-REGION	254	312
Inter-région routier	197	160
Inter-région rail	50	122
Inter-région Nav. Interiéure	7	10
Inter-région Modes Rapides	-	20
dont ferroviaire rapide	-	20
dont avion	-	-

Dans le scénario Hestia, c'est l'organisation interne qui fait que les distances parcourues diminuent. Nous ne mettons pas en cause la consommation de tonnes. D'une part, la création d'une structure polycentrique amène à la réduction d'un certain nombre d'importations et d'exportations qui se produiraient désormais dans le périmètre proche du centre. D'autre part,

les distances parcoures par les tonnes diminuent du fait que les tonnes importées et/ou exportées diminueraient leur parcours car une idée de logistique rationnelle entre en jeu.

Cette idée de réduction des kilométrages parcourus et de rationalisation des itinéraires conduirait certainement à se poser la question sur la situation des ports français. Selon les estimations des détournements du trafic maritime par des ports étrangers, le port du Havre calcule qu'ils s'élèvent (sur le marché du trafic conteneurisable) à 43,4% à l'exportation et 51,5% à l'importation en 2004 (Rapport Cour des Comptes). Même si ces chiffres ne sont pas directement comparables avec celles relatives à la part de marché des ports étrangers calculés en 1994 (12,76% à l'export et 8,85% à l'import), l'ensemble des chiffres fait penser que, dans une logique d'évolution Hestia, la question risque de se poser très rapidement.

Tableau 30 : Trafic international de marchandises dans Hestia

GTKM	2000	Hestia 2050
International Intra-Europe	143	211
Routier-IntraEurope	37	17
Rail-IntraEurope	6	44
IW-IntraEurope	2	3
Avion-IntraEurope	0,13	10
Maritime-IntraEurope	98	138
International Extra-Europe	2398	3766
Routier-ExtraEurope	1	2
Rail-ExtraEurope	0	1
IW-ExtraEurope	1	2
Avion-ExtraEurope	7	11
Maritime-ExtraEurope	2388	3750

4.3.3.3 La technologie, les émissions de CO2 et le facteur 4 pour le transport de marchandises dans les scénarios Hestia

Les émissions de CO2 du transport de marchandises dans Hestia

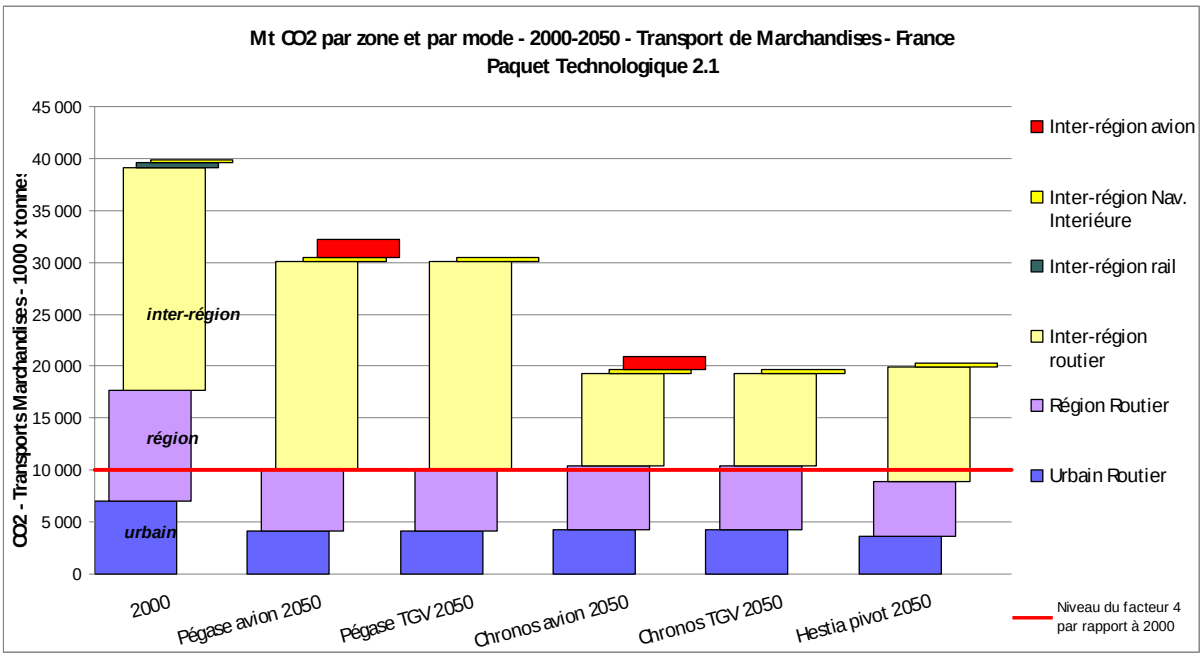
Dans le scénario Hestia, nous sommes plutôt dans une logique où la réduction des distances parcourues laisserait entrevoir une préférence, en matière d'investissements en R&D, des technologies visant des changements sur la sûreté des véhicules, leur fiabilité et leur autonomie. .

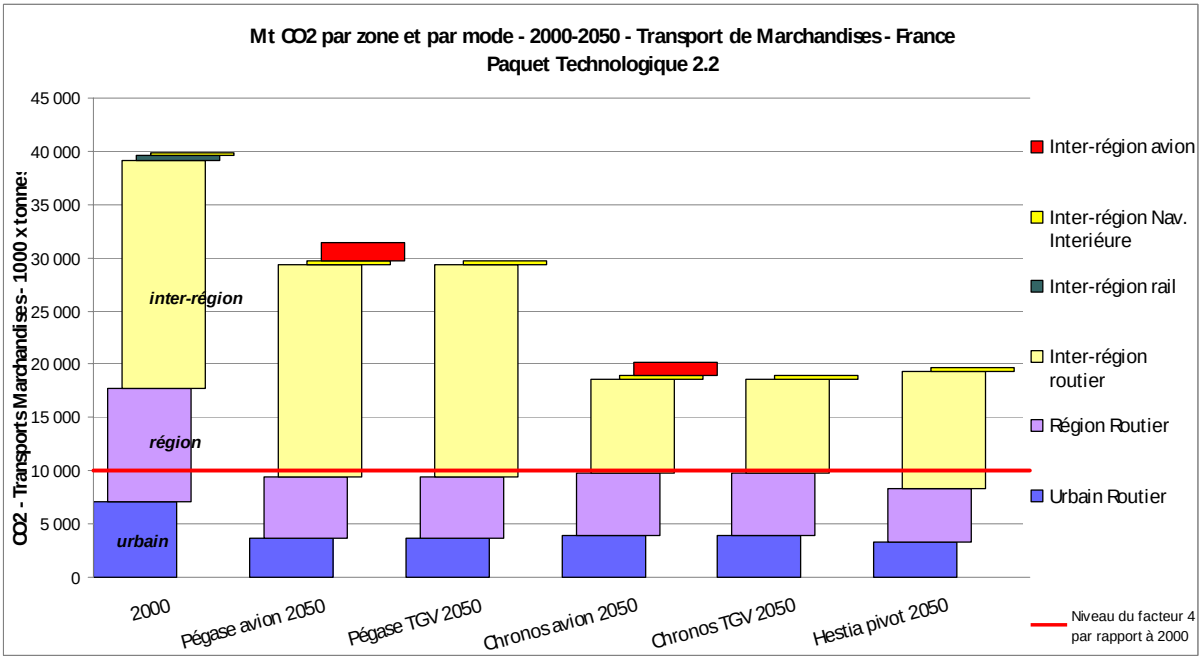
Une partie importante des investissements en R&D irait dans les sens du développement des technologies pour des transports dans des zones plutôt denses et rapprochées. Les développements iraient aussi dans le sens d'un système polycentrique interconnecté.

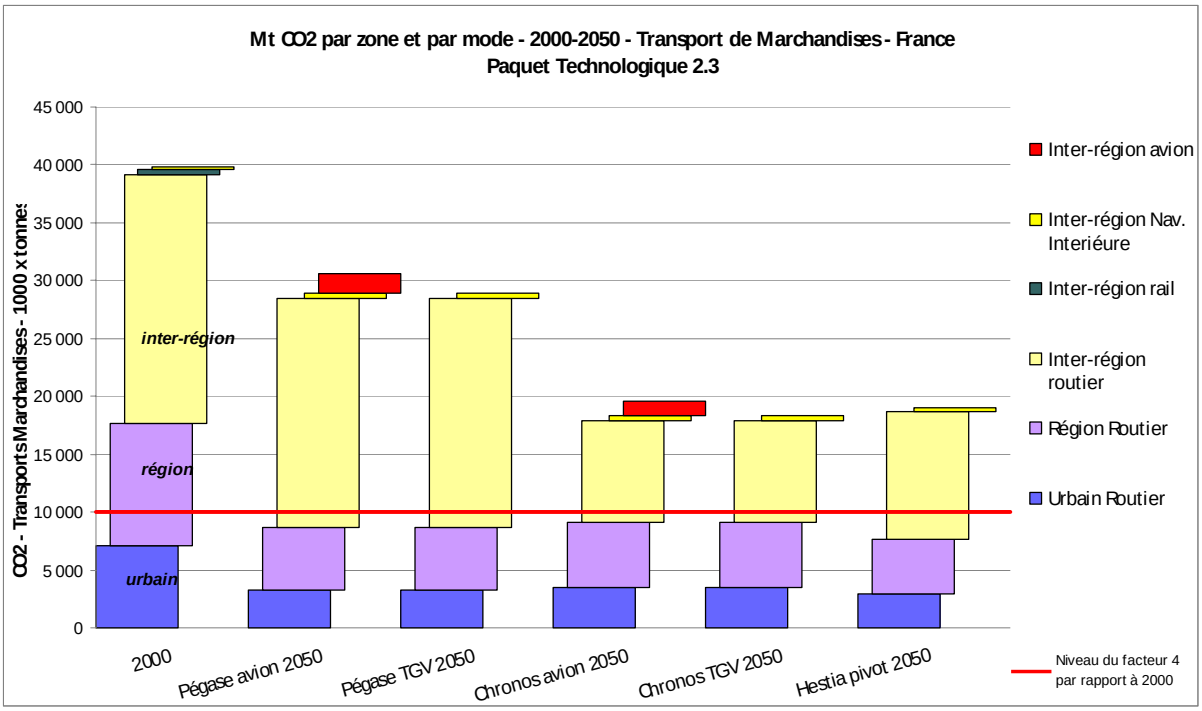
Ces changements d'organisation amèneront aussi des changements sur l'utilisation de véhicules qui seront positifs quant à l'objectif du facteur 4. La logique de réduction des distances parcourues par les marchandises conduit à se poser un certain nombre de questions quant aux développements technologiques.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

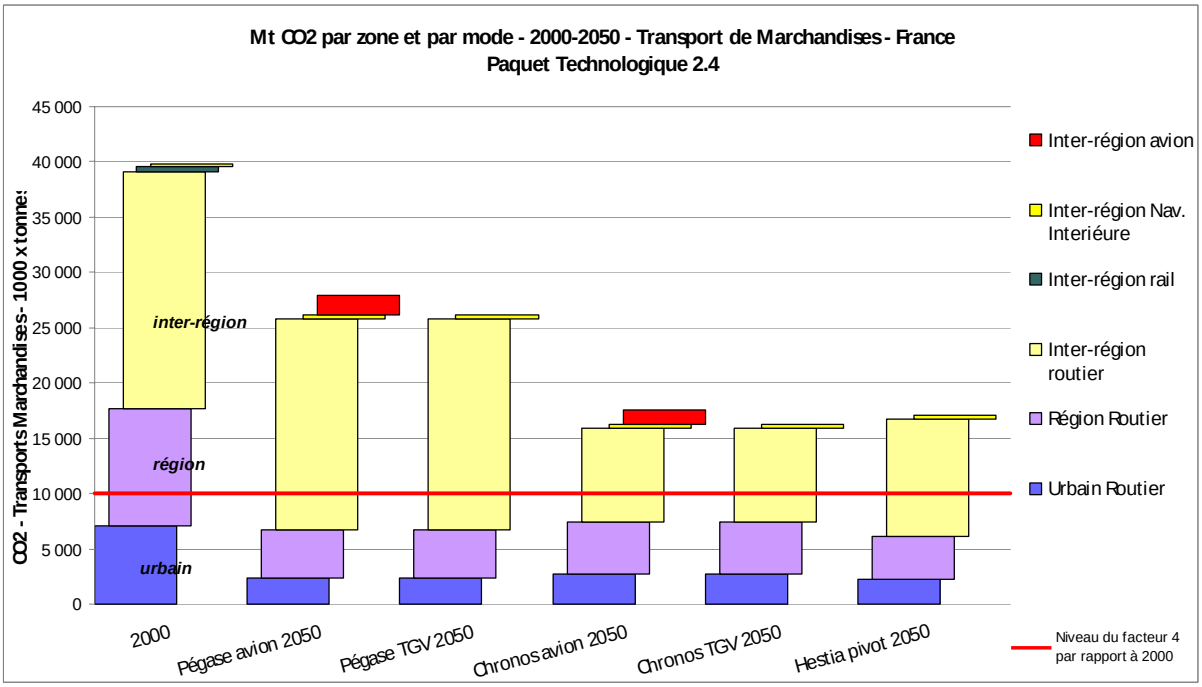
Le graphe suivant nous présente les résultats de la quantification des émissions de CO2 pour les différentes familles de scénarios. Les quatre paquets technologiques « hybrides » sont présentés pour chaque famille de scénarios.

Figure 66 : Les émissions de CO2 du transport de marchandises dans Hestia









Comme nous pouvons le voir dans le premier graphe, à elles seules, les émissions liées aux transports urbain et régional absorbent la quasi-totalité des émissions équivalentes à un facteur 4 dans les marchandises, avec le paquet technologique 2.1.

Dans le meilleur des cas (paquet technologique 2.4), les émissions restent encore en 2050 50% au-dessus de l'objectif facteur 4 pour les marchandises.

Comme le montre le tableau ci-dessous, si nous intégrons les émissions du transport international dans notre calcul, la situation se dégrade sensiblement par rapport à l'objectif « facteur 4 ».

Figure 67 : Les émissions de CO2 du transport international de marchandises dans Hestia

Mt CO2	2000	Hestia 2050
International IntraEurope	5145	9019
Routier-IntraEurope	3941	1096
Rail-IntraEurope	38	0
IW-IntraEurope	67	95
Avion-IntraEurope	120	6450
Maritime-IntraEurope	978	1378
International ExtraEurope	15534	23406
Routier-ExtraEurope	142	138
Rail-ExtraEurope	3	0
IW-ExtraEurope	47	73
Avion-ExtraEurope	2281	2686
Maritime-ExtraEurope	13061	20508

Comment arriver au facteur 4 pour les marchandises dans Hestia ?

Dans la logique d'Hestia, arriver au facteur 4 pour les émissions directes de CO2 du transport de marchandises impliquerait une baisse encore plus drastique des distances parcoures, de l'ordre de 14% (10% dans le régional et urbain et 15% sur la longue distance).

4.3.4. Comment vit-on dans Hestia en 2050 ?

4.3.4.1 Petites histoires de passagers…

MARIE et HERVE dans Hestia

Du fait du ralentissement généralisé des vitesses routières et suite à l'entrée en vigueur des cartes carbones individuelles, Marie a préféré se rapprocher de son lieu de travail. Le couple a dû quitter Roanne (42) pour la proche périphérie de Lyon (69). Marie peut effectuer son déplacement quotidien de 10 km sur l'autonomie de la batterie de son véhicule électrique. Quant à Hervé, son entreprise est restée prêt de Roanne. Hervé s'y rend deux jours par semaine en TERHQ, Train express régional à haute qualité de service, et le reste de la semaine, il travaille dans un centre de bureaux banalisés dans lequel des terminaux internet sont mis à disposition. L'accès à ces bureaux à portée de vélo lui évite ainsi une dépense de crédits carbone.

Marie utilise quotidiennement l'autoroute sub-urbaine apaisée limitée automatiquement à 65 km/h pour regagner un parking de délestage avant le péage cordon de Lyon. La plupart des pendulaires utilisent les bus express à haute qualité de service pour regagner le centre des villes. Les temps de déplacement quotidiens dépassent très rarement une heure.

Les plus fortunés choisissent généralement d'habiter au centre des villes. Ils utilisent le vélo électrique, le métro ou la marche à pieds, ce qui leur évite de prendre une voiture… et leur permet, en contrepartie, de prendre souvent l'avion avec les crédits carbone économisés. Mais, dans ces zones centres les prix de l'immobilier sont les plus élevés du fait des gains de temps occasionnés par la proximité et l'aménagement des villes. De fait, la ville s'est réorganisée autour de l'utilisation des modes doux et le vélo électrique y est « re »devenu la petite reine, mode de transport le plus adapté aux hyper-centres avec les voitures urbaines hybrides (communément appelées pot de yaourt urbain). Les rues foisonnent de tricycles porteurs d'enfants, de colis, de pizzas, de vélos à assistance électrique, de vélos avec remorques intégrées. Ces engins doux occupent l'espace autrefois réservé aux voitures utilisant les carburants fossiles. La cohabitation avec les piétons et les trams est aujourd'hui pacifiée par des espaces bien délimités. Le vélo s'est fait très confortable…et face aux demandes croissantes les constructeurs de cycles ont su trouver les solutions techniques les plus innovantes : le verrouillage centralisé et la puce GPS pour éviter le vol, le monitoring permanent de la transpiration, qui couplé au Gore Tex de 6ème génération a fait oublié à tous (sauf aux anciens) que le vélo pouvait faire transpirer du moins pour ceux qui souhaitent ne Pa utiliser l'assistance électrique. Très apprécié également, les poignées à chauffage induction électrique l'hiver, la selle morphologique, le brise vent-pluie magnétique, l'ABS, le système d'évitement piétons, les solutions intégrées véhicules-vélo etc.
La ville s'est aussi mise à la page. Les bornes inventées il y a 50 ans par le concept pionnier de Vélo'V se sont généralisées pour les particuliers ; et tous les commerçants en réclament à corps et à cris devant leur échoppe pour remplacer les vétustes places de parking voiture. Ces bornes, reliées au réseau électrique, sont alimentées en discontinu par des panneaux photovoltaïque et éoliennes urbains et en continu, par de l'électricité nucléaire ou hydraulique (lorsque le vent et le soleil dont défaut). Elles permettent de recharger les batteries électriques des vélos. Quant aux pistes cyclables, elles ont été interconnectées par un périphérique doux et se sont prolongées vers l'espace périurbain à 10-15 km des centres. Les habitants des centres ont le loisir de s'évader rapidement de la ville (en branchant l'assistance électrique limitée à 21 km/h couplée au brise vent magnétique) pour rejoindre à proximité des péages

cordons des zones vertes de détente. En sens contraire, on retrouve les habitants des périphéries qui empruntent chaque matin ces pénétrantes cyclables pour rejoindre leur lieu de travail. Plus que des axes de transport, ces pistes sont des lieux de vie collective et d'échange. Qu'il est loin, le temps ou les automobilistes étaient dans leur bulle, la mine triste ; les cyclistes eux, roulent toujours le sourire aux lèvres !

Les plus anciens et les familles se déplacent en bus à haute qualité de service ou en mini-voiturette électriques zéro émission soumises à des restrictions de circulations en centre ville. Les livreurs sont en camionnettes électriques, qui se sont faites mini-camionnettes pour des contraintes de stationnement et d'espace voirie et surtout pour éviter de renchérir le prix des denrées en utilisant des crédits carbones pour leurs déplacements.

Si la ville s'est apaisée et est devenue moins bruyante, la vie en proche périphérie présente d'autres d'avantages à ceux pour qui le temps est moins précieux… Bien que la qualité de l'air n'y soit pas meilleure qu'en centre ville, où elle s'est améliorée du fait de la généralisation des modes doux, il est possible d'accéder à la maison individuelle et bien plus facile d'y installer des panneaux solaires sur lesquels recharger les voitures hybrides. Cela permet d'économiser des crédits carbones sur les déplacements et le chauffage. Il est aussi plus facile d'y installer les réceptacles pour accueillir les caissons sécurisés d'approvisionnement des courses et autres articles commandés par internet.

Pour accéder au centre ville en venant de la périphérie, Marie se gare sur les parkings de délestages situés juste avant les péages et à proximité de la ceinture verte. L'accès au centre ville, même pour des voitures zéro émission, est en effet devenu très compliqué pour des raisons de rareté de l'espace. Le long du cordon de péage portiques, les zones multiservices, connectées au parking de délestage, se sont multipliées.

Ces zones multiservices permettent aussi de prendre ses rendez-vous médicaux, d'y régler les problèmes administratifs non réglables à distance, de faire du sport en salle. Les crèches, écoles et immeubles à assistance médicale ont aussi été construits dans des structures communes de proximité. Il est ainsi possible de récupérer les enfants tout en rendant visite aux grands parents, heureux de partager des moments avec les petits. Pour Marie, ces zones représentent le double avantage de mener toutes ces activités sans perte de temps liée au transport et sans dépenses de carbone inutiles. Il est aussi possible de se faire livrer des courses directement à bord des véhicules par des caissons réfrigérés et sécurisés *« on board delivery »*pour des commandes effectuées le matin même par téléphone portable. Il ne reste guère comme avantage aux habitants des centres ville que d'être plus proche des gares TERHQ et trains à très grande vitesse TTGV.

Depuis la mise en place des cartes carbones individuelles en 2025, la vie des retraités s'est améliorée. Pour ceux qui ne prennent pas ou plus l'avion, la revente de crédits carbone non utilisés constitue un complément de retraite non négligeable, et permet de financer sans ponctionner la Sécurité sociale, les soins et appartements médicalisés. Ainsi, les cartes carbones sont devenues sans que ce ne soit leur vocation première, les vecteurs micro-économiques d'une solidarité intergénérationnelle touristique et médicale : les ventes de crédits carbones par les générations nombreuses du baby boom de 1945 permettent en effet aux plus jeunes de partir en vacances en avion…et aux plus vieux d'être bien soignés…
La destination des prochaines vacances fait d'ailleurs l'objet de la discussion de ce soir dans la famille de Marie et Hervé. Comme à chaque fois, la question est de savoir si la cagnotte de crédit carbone permettra de partir en avion ou non. En additionnant les crédits carbones

économisés sur le chauffage et les déplacements de Marie et Hervé ainsi que des enfants, la famille peut prendre l'avion en moyenne une fois par an pour une destination lointaine (Etats-Unis, Asie). Mais pour cela, il est nécessaire de limiter les déplacements longs (hors batterie) tout au long de l'année (que ce soit pour partir au ski en prenant le TGVHQ) ou pour aller voir les grands parents à Grenoble.

Ce week-end, comme tous les 15 jours, ils iront justement à Grenoble rendre visite aux grands parents. Depuis que grand père, 105 ans et en pleine forme, leur promet une « vraie » fondue savoyarde. A cheval sur les traditions, il a en effet tenu à aller acheter lui-même la bouteille d'alcool à brûler dans un magasin spécialisé en vente d'énergie fossile de détail au centre de Grenoble. Vaille que vaille, même si pour cela il a dû utiliser 10 crédits sur les 200 que compte sa carte chaque année … Il est 11h00 du matin à la gare de Grenoble. Le TERHQ est annoncé, grand père a garé son tricycle électrique caréné à l'extérieur sur une borne auto rechargeable. Marie, Hervé et Marta demandent un transfert automatique de leur caisson bagages sur une Citrosmart électrique urbaine de location (un transfert automatique de bagages mis en caisson est assuré par le TERHQ vers les bornes de tricycles sur le même système que les aéroports). Compte tenu du taux de remplissage supérieur à 2, la famille bénéficie d'un demi-tarif pour circuler dans Grenoble, ce service est d'ailleurs compris dans le prix du billet TERHQ.

L'idée de la bonne fondue a aiguisé les appétits et bientôt, la précieuse énergie fossile réchauffera le fromage et les ventres de toute la famille. Mais son prix est vraiment dissuasif. Pour l'année prochaine, le grand père annonce qu'il va se doter d'un petit fourneau à bois !

Ulysse et Pénélope, deux retraités emblématiques des scénarios Hestia

Heureux qui comme Ulysse a fait un beau voyage… Le début du poème est connu, la suite l'est moins, qui insiste sur les charmes du retour au pays. Ulysse enfin réunie à Pénélope sont les deux figures emblématiques de la famille Hestia. Retraités et peu mobiles, ils développent surtout des activités de proximité, notamment la culture de leur jardin qui occupe le plus clair de leur temps éveillé. En mobilisant un autre registre sémantique, nous pourrions dire qu'ils sont « rangés des voitures ». Ils ont d'ailleurs depuis longtemps vendu leur automobile et se déplacent en utilisant le taxi communal fonctionnant comme un service de transport à la demande, bon marché s'ils font la réservation au moins deux jours à l'avance pour permettre au transporteur, qui ne reçoit pratiquement pas de subventions publiques, de s'assurer d'un taux de remplissage élevé….à poursuivre…

4.3.4.2 *Comment déplace-t-on les marchandises dans Hestia ?*

Evénements, législation et décisions	Analyse économique	Technologie	Collecte	Distribution	Inter-entreprise
Adoption de permis négociables d'émissions de CO2 commercialisables au niveau des Etats entre pays de l'annexe B du protocole de Kyoto. 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, l'agriculture industrielle etc.), pour le traitement et pour le transport, est réduit sensiblement, particulièrement du fait de la réduction des distances de transport. Rappelons qu'en 2000, le transport était responsable de plus de 90% du contenu énergétique de quelques produits frais. En raison de la hausse globale du coût du transport, le trafic de longue distance se concentre progressivement sur le transport de produits qui ont des spécificités géographiques fortes, en raison du climat, de	La relocalisation des plateformes industrielles et leur nouvelle organisation a diminué sensiblement la distance moyenne de transport des marchandises Le transport de fret ferroviaire est utilisé également sur des distances courtes quand les volumes à transporter sont suffisamment grands (comparable à l'utilisation du transport ferroviaire à l'intérieur de grands centres industriels comme ceux de l'industrie sidérurgique). La plateforme industrielle est organisée de façon à ce 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).	Les distances moyennes parcourues par tonne diminuent de 30% sur les routes et les véhicules électriques et hybrides sont tout à fait adaptés au transport régional de marchandises. Le transport interrégional et intra-européen est fait prioritairement par le rail et les voies navigables. Le transport des marchandises extra-européennes est fait par voie maritime. Les ports français voient un fort développement des infrastructures ferroviaires près des ports. 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. La part des	La carte des flux est revue et une logique de massification couplée à la proximité est à l'œuvre. Un grand développement visant l'optimisation des collectes est réalisé grâce à les nouvelles technologies d'information embarquées. Les collectes sont réalisées suivant une logique de maximisation des tonnes chargées par rapport à une refondation des cartes de livraison qui réduisent les distances et les parcours à vide. Des centres de collecte plus proches des zones de consommation sont développés, avec en tête : un service multimodal de qualité et de proximité. De ce fait, l'autonomie des véhicules routiers ne pose pas un problème au niveau des distances et il y a plutôt une recherche très importante sur le	Les consommateurs s'habituent à avoir des magasins de proximité. Les achats par internet deviennent une chose du quotidien pour les produits courants et pour les produits de consommation qui ne se trouvent pas dans les petites-surfaces de quartier. Les « vides » 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 » et couleurs avant de commander des produits « tactiles La distribution met en œuvre des circuits de livraison très détaillés qui livrent aux petits-surfaces les commandes spéciales des habitants du quartier en même temps que le stock de produits	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 d'offrir des produits de façon rapide et peu onéreuse (environnementale et économique) aux distributeurs. Certains y voient une opportunité pour offrir 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 développement des schémas de partenariat entre ses différents clients, en même temps que certaines entreprises commencent à développer des services de co-transport intégré avec ses concurrents et ses distributeurs.

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. La relocalisation des plateformes industrielles est basée sur la nouvelle législation sur 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 a rendu également possible l'application des nouvelles technologies intelligentes dans le transport combiné.	Dans des zones commerciales des centres ville historiques, les pièces de stockage ont été progressivement converties 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 plus 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 ceci compense pur la perte en économies d'échelle. Ceci aura aussi des impacts favorables sur l'emploi.	marchandises françaises passant par des ports étrangers baisse sensiblement ainsi que le trafic de transit. Un grand réseau ferroviaire est mis en place d'ici 2020. 3 systèmes de chargement sont disponibles: traditionnel, autoroute ferroviaire avec les camions entiers sur le train, et le transport combiné, avec seulement des remorques et des conteneurs sur le train. Des parties entières de la production et de la logistique sont sous-traitées à des entreprises locales qui gèrent la production et la logistique de quelques produits semblables commercialisées sous différentes marques.	développement de camions avec une capacité plus importante. Une logique de massification très importante est née et nous parlons même de co-livraisons où les prestataires 3PL mettent en place des cartes communes des réseaux de collecte.	à vendre. Ils mettent à disposition des catalogues de « matériaux-couleurs » pour les produits « tactiles » qu'ils commercialisent par internet. Des points de livraison par zone voient le jour et deviennent même une partie importante de l'activité de quelques entreprises qui ont de points de livraison de proximité partout en France. Chaque zone commerciale ou rue principale a son propre centre local de distribution tenu par un gérant.	La logique de massification pousse à avoir des livraisons des pièces détachées massifiées qui occupent moins de volume (pour un poids égale) que le produit fini. De ce fait, nous voyons un accroissement des usines de dépotage et traitement des marchandises sur place ainsi que des prestataires 4PL (fourth party logistics). De même, les producteurs demandent l'instauration des normes strictes en matière de standardisation et de qualité afin de pouvoir massifier et éviter les retours de produits. Du côté des logisticiens, la pratique de la massification est la norme, les dépôts communs et co-livraisons sont généralisés.

4.3.5. Les enseignements de Hestia pour le facteur 4 et les politiques publiques

4.3.5.1 La mobilité durable dans les scénarios Hestia

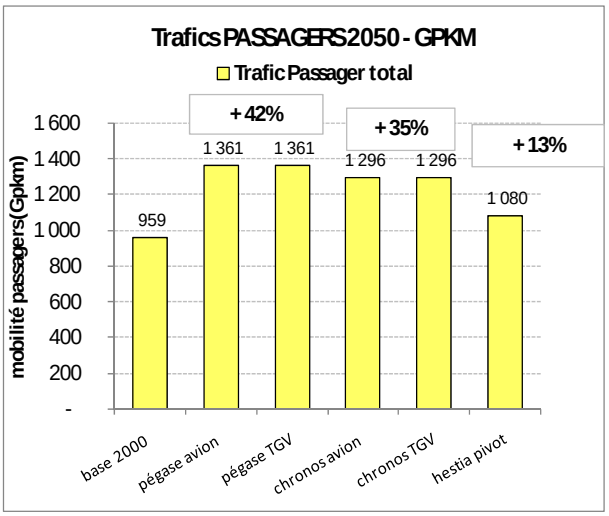
On s'attache ici à globaliser les projections d'émissions de CO2 auxquelles conduisent les différents paquets technologiques « raisonnables » pour les passagers et les marchandises, en prenant en compte les émissions indirectes liées aux différentes filières du puits à la roue.

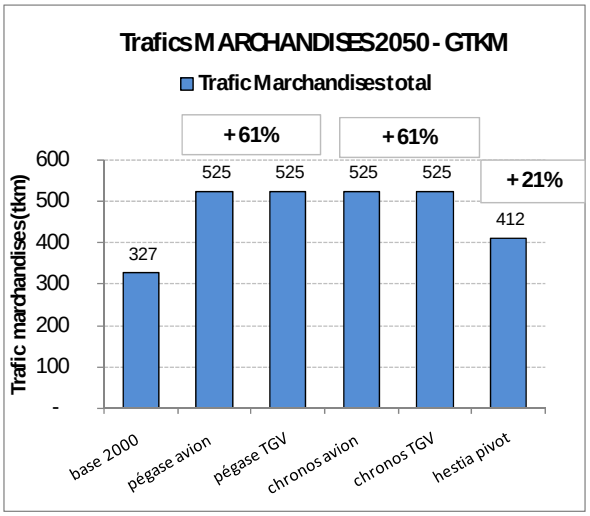
Deux aspects seront traités dans cette présentation :

- où nous conduisent les trafics « Hestia » et les technologies du paquet 2 au regard des émissions de CO2 du système de transport ?
- que faudrait-il faire en plus, si besoin, pour atteindre globalement le facteur 4 dans ces scénarios Hestia ?

Les émissions directes de CO2-énergie des transports atteignent le facteur 4 avec le paquet technologique 2.4 dans Hestia

Le graphique ci-dessous récapitule les projections de trafic des personnes et des marchandises:

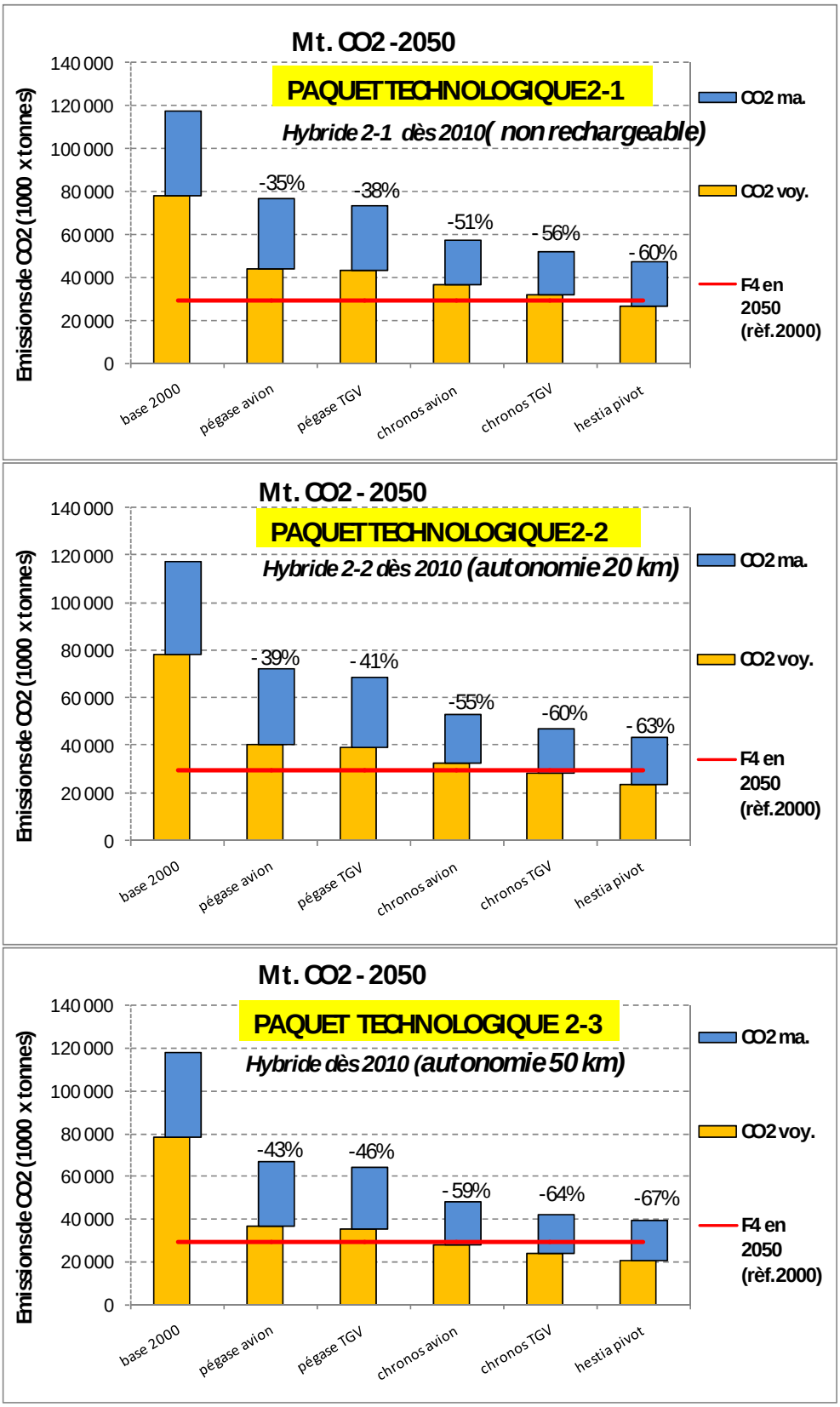


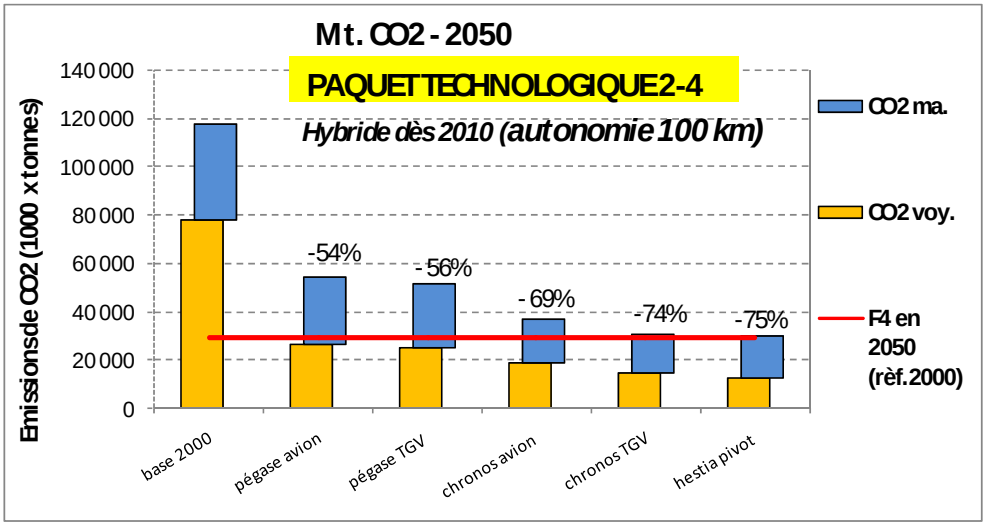


Ces augmentations de trafic vont de pair avec une baisse des émissions de CO2, toujours moindre que celle constatée pour les seules émissions directes du transport de passagers. Ce constat est valable quelque soit le paquet technologique utilisé.

Les graphiques ci-dessous présentent les niveaux et les structures des émissions directes de CO2 des transports en 2050 dans le scénario Hestia, pour les 4 paquets technologiques 2-1 à 2-4.

Figure 68 : Les émissions directes de CO2 du transport dans Hestia





L'intégration des trafics ne permet pas ou plus au scénario Hestia d'atteindre le facteur 4 dans la configuration 2-3, ce qui était le cas pour la seule variante passagers. En revanche, Hestia atteint le facteur 4 sur les passagers et marchandises dans la configuration technologique 2-4.

Alors que la variante tendancielle Pégase avion parvient à 70% de l'objectif par un effort exclusivement technologique, le scénario Hestia parvient dans la même configuration technologique à réaliser le facteur 4 par un effort additionnel de répartition modale couplé à une moindre progression des trafics.

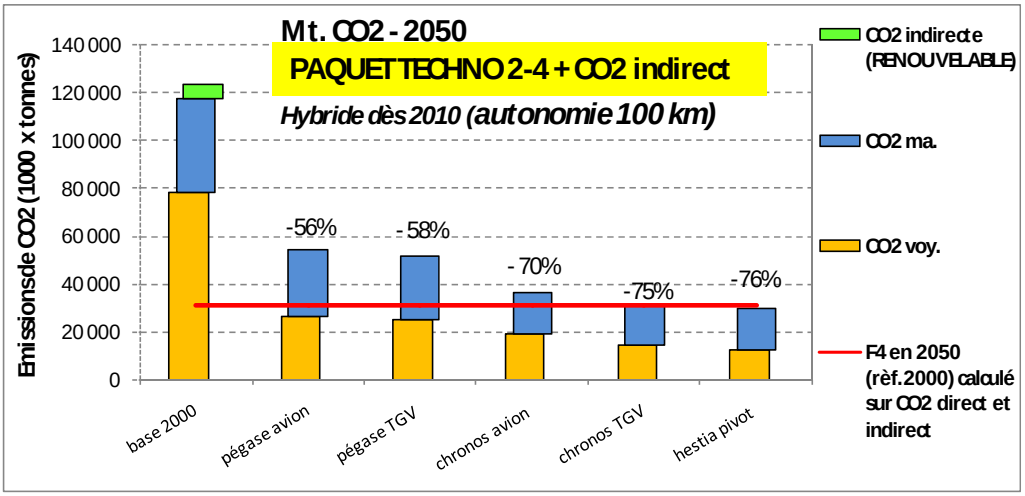
On peut tirer deux enseignements de Hestia :

- il est possible d'atteindre le facteur 4 tout en restant dans un sentier technologique raisonnable dont la limite est celle du paquet 2-4, et dans un contexte de développement réaliste des infrastructures de transport ferroviaire, notamment à grande vitesse à l'horizon 2050.
- au-delà du fait qu'il peut conduire au facteur 4 de façon réaliste, Hestia peut être réellement considéré un scénario de mobilité durable pour plusieurs raisons :
    - la mobilité progresse au rythme de la population et du taux d'équipement des ménages (du fait de l'élasticité de la vitesse au PIB calée sur 0, et du budget temps calé sur 1 heure) : Hestia est un univers qui ressemble à celui que nous connaissons du point de vue de la satisfaction des besoins de mobilité.
    - le budget temps transport se maintient sur une régularité historique à la différence de Chronos : il n'y a donc pas de dégradation dans la structure d'usage du temps et l'utilité qui y est attachée dans Hestia.
    - un certain nombre de facteurs limitants déjà à l'œuvre aujourd'hui sont pris en compte tel le vieillissement démographique, les limites spatiales et physiques de progression des trafics VP en urbain, les limites de progressions des trafics en longue distance en VP du fait de la montée en puissance des modes rapides. De ce point de vue Hestia est porteur d'un monde moins dépendant de l'automobile et de ses nuisances.

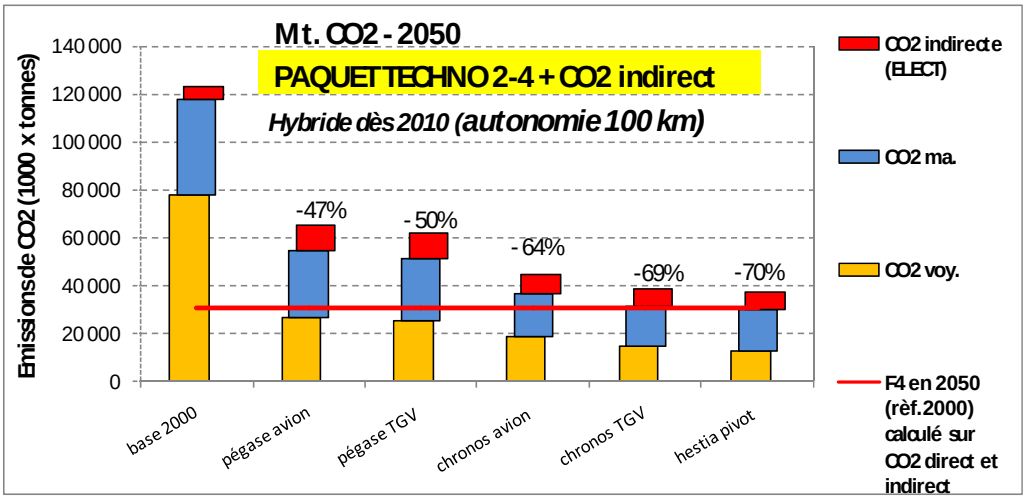
On peut atteindre le facteur 4 avec les émissions indirectes dans Hestia

La prise en compte des émissions indirectes du raffinage, de la production d'électricité et de la production de biocarburants nous éloigne de l'objectif F4 dans la plupart des cas, sauf celui où l'électricité pour le transport est produite intégralement avec du nucléaire et des renouvelables en 2050.
Dans ce cas, la baisse des émissions directes et indirectes va légèrement en-deçà du facteur 4 dans la configuration la plus favorable du paquet technologique 2-4 (contre 75% pour les seules émissions directes).

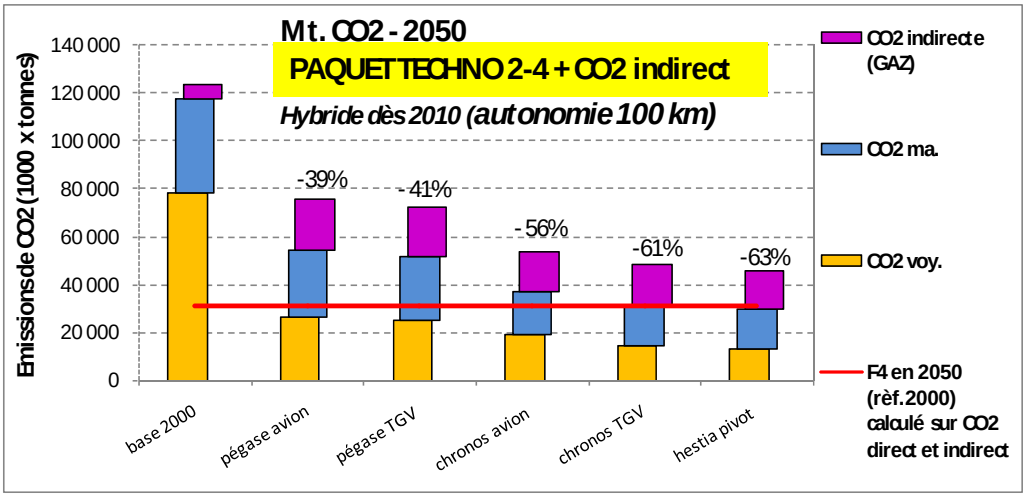
Figure 69 : Les émissions directes et indirectes de CO2 du transport de marchandises dans Hestia



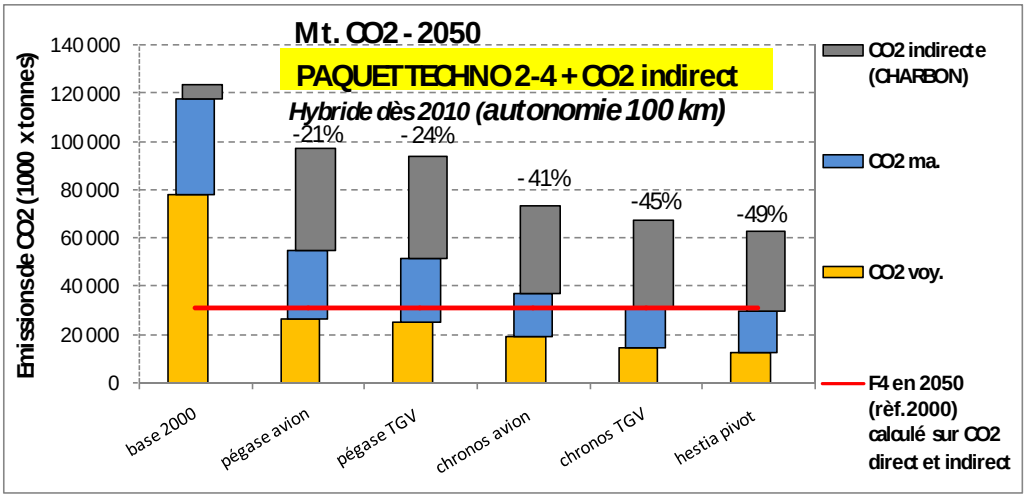
Avec une structure moyenne de production de l'électricité de réseau cohérente avec l'objectif facteur 4 (cf. travaux de la Commission de l'Energie 2007 sur le F4), la baisse des émissions directes et indirectes n'atteindrait plus, au mieux, que 70% (variante TGV couplée avec le paquet technologique 2.4).



Si l'électricité utilisée par les hybrides et les véhicules électriques devait être produite entièrement à partir de cycle combiné gaz performant, la réduction d'émissions directes et indirectes n'atteindrait au mieux que 63%



Si, enfin, cette électricité devait âtre produite à partir de centrales conventionnelles à charbon, la baisse des émissions globales pourrait être limitée à 49%, soit un facteur 2.



4.3.5.2 Quelles politiques publiques dans Hestia ?

Au-delà du nécessaire soutien à l'innovation technologique dans les transports (hybrides rechargeables bi-énergie, solutions logistiques, transport ferroviaire rapide de fret,..), le défi majeur des politiques publiques dans le scénario Hestia est celui de la maîtrise simultanée de la vitesse et de l'espace. Il s'articule autour des idées-force suivantes:

- réduire les vitesses autorisées sur toutes les infrastructures routières, de 10 à 20% selon les cas ;
- soutenir le développement de l'offre de transport ferroviaire, des TCSP urbains au transport rapide de fret, en passant par l'intermodalité ;
- appuyer la réduction programmée des émissions de CO2 sur un système étendu de quotas et de permis négociables incluant les particuliers.

L'autre défi des politiques publiques dans ces scénarios Hestia est celui du confinement du développement du transport aérien, notamment par la mise en place d'une politique restrictive sur les constructions/agrandissements des aéroports et sur les couloirs aériens.

Le tableau ci-dessous synthétise l'expression des politiques publiques dans les scénarios Hestia, selon les conventions adoptées dans la méthode d'évaluation des politiques publiques présentée plus haut.

Tableau 31 : Mesures phares des politiques publiques dans les scénarios Hestia

INTENSITE	HESTIA
Prix et taxes	
Permis négotiables CO2	3
Taxation des camions à la tonne-km	2
Péages routiers pour les maxicodes	2
Subventions au transport multi-modal	2
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	1
Réduction des taxes et subventions sur les ENR	2
Subventions au véhicule electrique	1
Subventions au véhicule urbain	1
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	1
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	1
Bonus/ malus en fonction des taux d'émission	3
Péage sur les voies urbaines rapides	2
Péage sur les artères urbaines	2
Péage sur les autoroutes	2
Incitations/ taxation usage des VP des employés	2
Réglementation	
Normes CO2 pour les VP	2
Priorités aux véhicules urbains	3
Restriction d'accès aux veh. conventionnels en zone urbaine	3
Réforme des réglements de construction des parking	3
Renforcement des limites de vitesse	2
Contrôle plus strict des vitesses et tremps de conduite des PL	2
Organisation du transport au niveau Européen	2
Harmonisation des réglementations nationales pour le rail	2
Investissements, aménagement	
Extension des infrastructures pour le fret et les passagers	3
Extension des infrastructures TGV	2
Extension du réseau multi-modal route/ fer, route/ VE	3
Meilleur service et logistique pour le rail fret	3
Priorités aux véhicules de transport public	2
Financement des extensions de transports régionaux rapides	2
Accroissement des fréquences, extension des dessertes	2
Rationalisation du développement urbain et de l'habitat	3
Restructuration de la fiscalité urbaine	3
Extension du stationnement payant	2
Fixation d'un prix minimum du stationnement	2
Réduction des espaces habilités au stationnement	2
Amélioration des pistes cyclables et autres voies piétonnières	3
Centre-villes sans voiture	3
Extension des zones urbaines limitées à 30km/ h	3
Plan de Déplacement Urbain pour les villes > 100 000 h	3
Politique d'implantation pour les industries qui déménagent	3
Zones industrielles	3
Autres	
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	2
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	2
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	2
Programmes nationaux d'information du grand public	3
Programmes d'éducation et de formation	3

4.3.5.3 Qui perd, qui gagne dans les scénarios Hestia ?

Les politiques publiques menées dans le scénario Hestia vont faire porter la moitié de l'effort sur les constructeurs automobiles, la moitié sur les transporteurs et les filières industrielles impliquées dans la construction ferroviaire.

En imposant un rythme à la baisse des émissions de CO2 par le biais de quotas, les pouvoirs publics vont contraindre les constructeurs à un effort d'innovation continu, dont les effets seront, comme pour les autres scénarios, de deux types opposés :

- D'un côté, il faut s'attendre à des hausses significatives des coûts de production des véhicules, et donc des prix de vente, dont les conséquences sur les conditions de concurrence entre constructeurs dépendront étroitement de leurs positionnements en structure de gamme ;
- En revanche, le processus d'innovation devrait conférer un avantage comparatif à long terme à l'ensemble de ces constructeurs, sur les marchés émergents notamment, du fait de la globalité des contraintes provenant des ressources pétrolières et du changement climatique.

De même, toujours du fait des quotas, les pouvoirs publics vont rendre les conditions d'exploitation des transporteurs routiers de plus en plus difficiles par rapport aux transporteurs ferroviaires, lesquels seront en tout état de cause beaucoup moins affectés.

Enfin, les fortes perspectives de développement des infrastructures ferroviaires, notamment rapides, devrait donner un considérable stimulus à l'activité de tous les acteurs présents dans les filières, depuis les sociétés de génie civil aux équipementiers en passant par les logisticiens et les offreurs de services transport.

Le tableau ci-dessous donne une vision quantifiée des impacts relatifs des mesures de politiques publiques sur les grands acteurs industriels, selon les conventions exposées plus haut. On notera l'existence d'un risque que les exigences technologiques n'affectent globalement négativement l'activité de l'ensemble de ces acteurs (hors effet indirect via la maîtrise technologique sur les marchés internationaux).

Il montre que l'impact négatif sur l'ensemble des acteurs du secteur est plutôt moins prononcé que dans le scénario Chronos, bien qu'Hestia suppose un renforcement des contraintes. Apparemment, cela voudrait dire qu'un système de régulation par les quotas aurait plutôt plus de chance d'être accepté par les acteurs qu'un système de contraintes uniquement par la tarification et la fiscalité.

Tableau 32 : Qui perd, qui gagne, dans Hestia

MESURES	Fabricants automobiles et sous-1traitants	Fabricants d'équipement électriques et électroniques	Producteurs de biens intermédiaires pour le transport	Autres fabricants fournisseurs des transports	Companies ferroviaires	Transporteurs routiers	Companies de transports publics urbains	Companies d'autocars	Autres producteurs de services de transport	Garagistes	Compagnies de télécommunication	Compagnies offrant d'autres services au transport	Raffineurs et distributeurs pétroliers	Compagnies électriques	Compagnies gazières	Agriculteurs	Ensemble
Prix et taxes																	
Permis négotiables CO2	-823	76	0	55	521	-536	88	-353	-139	-185	15	-15	-1058	69	-50	126	-2209
Taxation des camions à la tonne-km	-144	30	3	28	104	-260	9	-24	39	-12	0	12	0	3	0	0	-212
Péages routiers pour les maxicodes	-144	42	3	28	104	-260	9	-24	39	-12	3	22	-104	16	0	0	-278
Subventions au transport multi-modal	-96	74	9	40	396	-320	27	-48	42	-36	0	18	0	12	0	0	118
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	19	-4	1	-2	-11	45	-35	-22	-5	7	0	-1	7	-2	9	0	8
Réduction des taxes et subventions sur les ENR	0	-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-19	-2	-2	72	41
Subventions au véhicule electrique	0	70	0	-1	-4	0	-18	-4	0	4	0	-1	-31	19	0	0	35
Subventions au véhicule urbain	36	-2	1	-1	-7	0	-12	-7	-3	7	0	0	4	-1	0	0	15
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	-6	54	-3	-8	-28	80	0	18	-11	0	0	-6	-76	8	5	0	28
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	-42	54	-3	-8	-28	15	-30	12	-6	12	0	-6	-88	7	5	0	-106
Vignettes variables en fonction des taux d'émission	-180	48	-5	0	18	0	14	18	14	-18	0	-5	-228	20	15	0	-290
Péage sur les voies urbaines rapides	-103	25	-2	9	50	-120	86	-26	22	-60	6	7	-67	7	2	0	-164
Péage sur les artères urbaines	-74	14	-2	4	29	-60	61	-10	11	-53	6	4	-53	5	2	0	-116
Péage sur les autoroutes	-184	36	0	18	152	-260	-9	-208	57	-76	10	9	-100	6	3	0	-546
Incitations/ taxation usage des VP des employés	-46	11	-2	2	22	0	54	22	0	-60	6	4	-38	7	2	0	-17
Réglementation																	
Normes CO2 pour les VP	-499	125	-5	30	83	-48	106	83	48	-141	0	5	-218	54	-11	32	-355
Priorités aux véhicules urbains	156	39	9	0	-54	0	-72	-54	-27	114	5	20	36	0	0	0	171
Restriction d'accès aux veh. conventionnels en zone urbaine	-204	102	0	18	132	-98	90	-42	14	-150	20	29	-150	38	0	0	-203
Réforme des réglements de construction des parking	-68	11	-3	0	22	0	54	22	0	-79	12	12	-22	5	0	0	-35
Renforcement des limites de vitesse	-198	19	0	24	102	-128	14	-83	77	-102	0	10	-38	5	0	0	-299
Contrôle plus strict des vitesses et tremps de conduite des PL	-179	58	5	38	333	-696	43	-38	62	-58	0	19	-38	10	0	0	-442
Organisation du transport au niveauEuropéen	-36	14	2	4	46	-30	0	-24	-13	-7	0	2	-22	2	0	0	-62
Harmonisation des réglementations nationales pour le rail	-72	74	3	12	192	-65	21	-52	0	-36	13	19	-88	22	0	0	43
Investissements, aménagement																	
Extension des infrastructures pour le fret et les passagers	-204	75	5	18	630	-98	72	-42	-32	-132	0	9	-72	18	0	0	248
Extension des infrastructures TGV	-112	44	3	3	420	0	48	-16	-60	-88	0	0	-48	12	0	0	206
Extension du réseau multi-modal route/ fer, route/ VE	-186	75	5	23	360	-143	27	-54	32	-132	20	29	-36	14	0	0	32
Meilleur service et logistique pour le rail fret	-72	45	9	23	276	-120	27	-36	-14	-36	0	14	-18	9	0	0	107
Priorités aux véhicules de transport public	0	12	0	6	24	0	120	24	0	-24	0	6	0	6	0	0	174
Financement des extensions de transports régionaux rapides	-46	16	0	4	77	-9	29	7	0	-46	0	2	-7	5	0	0	32
Accroissement des fréquences, extension des dessertes	-46	16	0	4	38	-9	58	7	0	-46	0	2	-7	5	0	0	22
Rationalisation du développement urbain et de l'habitat	-11	22	0	3	11	0	46	11	-8	-32	9	5	-11	5	0	0	50
Restructuration de la fiscalité urbaine	-68	22	-3	0	22	0	54	22	0	-79	12	12	-68	17	0	0	-59
Extension du stationnement payant	-46	7	-2	0	14	0	36	14	0	-53	8	8	-14	4	0	0	-23
Fixation d'un prix minimum du stationnement	-7	11	0	0	0	0	13	0	-5	-14	8	8	-7	2	0	0	7
Réduction des espaces habilités au stationnement	-64	38	0	3	52	-15	78	52	-18	-100	13	16	-12	12	0	0	55
Amélioration des pistes cyclables et autres voies piétonnières	-11	0	0	6	-11	0	-27	-11	0	11	3	6	11	-3	0	0	-25
Centre-villes sans voiture	-18	36	0	5	18	0	77	18	-14	-54	20	24	-18	9	0	0	102
Extension des zones urbaines limitées à 30km/ h	-18	27	0	0	0	0	32	0	-14	-36	20	20	-18	5	0	0	17
Plan de Déplacement Urbain pour les villes > 100 000 h	-68	11	-3	0	22	0	54	22	0	-79	12	12	-22	5	0	0	-35
Politique d'implantation pour les industries qui déménagent	-76	43	5	19	72	-131	8	-43	19	-32	12	23	-22	5	0	0	-97
Zones industrielles	-76	43	5	19	72	-131	8	-43	19	-32	12	23	-22	5	0	0	-97
Autres																	
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	0	7	0	4	14	0	36	14	0	-14	0	4	-24	5	2	24	72
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	-184	30	-6	0	24	0	39	24	9	-48	13	7	-200	13	10	0	-269
Programmes nationaux d'information du grand public	-22	27	3	5	36	-14	27	-11	-16	-32	9	5	-11	5	0	0	13
Programmes d'éducation et de formation	-22	27	3	5	36	-14	27	-11	-16	-32	9	5	-11	5	0	0	13
Ensemble du programme	**-4243**	**1596**	**36**	**439**	**4381**	**-3421**	**1388**	**-896**	**103**	**-2073**	**271**	**394**	**-3029**	**475**	**-10**	**254**	**-4336**

4.3.5.4 Comment évoluent les prix et les coûts du transport dans les scénarios Hestia ?

Un des effets des mesures de politique publique dans Hestia est de renchérir le prix de vente des véhicules routiers, dans un contexte où le système de quotas et permis négociables devrait grever fortement les coûts des gros émetteurs de CO2, transports routier et aérien au premier chef.
Bien sûr, la forte diminution des consommations unitaires de produits pétroliers des véhicules routiers résultant des progrès technologiques et des substitutions vers les biocarburants et l'électricité, viendra contrebalancer cet impact du système de quota sur le coût d'utilisation des véhicules.

On peut valablement considérer que le surcoût des véhicules dû aux évolutions technologiques sera, pour les consommateurs finals, globalement compensé par les économies sur les carburants, faute de quoi il n'y aurait pas de marché pour ces véhicules. Pour autant, il n'en reste pas moins que l'ensemble du coût (acquisition + fonctionnement) devrait être appelé à croître, mais vraisemblablement à un rythme maximum similaire à celui de la croissance des revenus (maintien du coefficient budgétaire).

Pour le transport de marchandises, le système de quotas aura un double effet :

- entraîner le coût du transport routier à la hausse, en particulier sur la longue distance où la réduction des consommations de carburant sera moindre ;
- entraîner le coût moyen du transport également à la hausse, le recours accru au transport ferroviaire ne compensant pas intégralement, loin s'en faut, le surcoût du transport routier dû aux quotas.

Le tableau ci-dessous donne une vision quantifiée des impacts relatifs des mesures de politiques publiques sur les grands postes de coût des transports, selon les conventions exposées plus haut. Il montre, là aussi, un impact global sur le coût moyen de transport plutôt plus modéré dans Hestia que dans Chronos, tout au moins dans la variante TGV de ce dernier.

Tableau 33 : Quelles évolutions des coûts de transport dans Hestia

MESURES	Prix d'achat des voitures	Prix d'achat des VUL	Coût d'usage de la voiture	Coût d'usage du VUL	Prix du billet de train	Prix du billet de transp. public	Prix du billet d'autocar	Prix du billet d'avion	Prix du transport routier de fret	Prix du transport de fret par rail	Prix du transport de fret par VE	**Ensemble**
Prix et taxes												
Permis négotiables CO2	42	63	630	504	42	168	168	252	420	63	84	2436
Taxation des camions à la tonne-km	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	200
Péages routiers pour les maxicodes	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	0	200
Subventions au transport multi-modal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-30	-10	-40
Réduction des taxes sur le GPL, GNV	0	0	-45	-36	0	-6	-6	0	-30	0	0	-123
Subventions au véhicule electrique	-12	-18	-30	-24	0	6	0	0	0	0	0	-78
Subventions au véhicule urbain	-12	-9	-15	-12	0	6	0	0	0	0	0	-42
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les PL	0	0	0	0	0	-20	-20	0	-50	0	0	-90
Incitations en faveur des hybrides et PAC pour les VP	-20	-30	-50	-40	0	0	0	0	0	0	0	-140
Vignettes variables en fonction des taux d'émission	30	45	-75	-60	0	0	0	0	0	0	0	-60
Péage sur les voies urbaines rapides	0	0	120	96	0	0	24	0	60	0	0	300
Péage sur les artères urbaines	0	0	120	96	0	0	0	0	0	0	0	216
Péage sur les autoroutes	0	0	200	160	0	0	40	0	100	0	0	500
Incitations/ taxation usage des VP des employés	0	0	60	0	-12	-12	0	0	0	0	0	36
Réglementation												
Normes CO2 pour les VP	96	144	-480	-384	0	0	0	0	0	0	0	-624
Priorités aux véhicules urbains	0	0	-75	-60	0	0	0	0	0	0	0	-135
Réforme des réglements de construction des parking	0	0	45	36	0	0	0	0	0	0	0	81
Renforcement des limites de vitesse	0	0	-80	-64	0	0	32	0	80	0	0	-32
Contrôle plus strict des vitesses et tremps de conduite des PL	0	0	0	0	0	0	0	0	320	0	0	320
Organisation du transport au niveau Européen	0	0	0	0	-12	0	0	0	0	-18	0	-30
Harmonisation des réglementations nationales pour le rail	0	0	0	0	-20	0	0	0	0	-30	-10	-60
Investissements, aménagement												
Extension des infrastructures pour le fret et les passagers	0	0	0	0	30	0	0	0	0	45	0	75
Extension des infrastructures TGV	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	20
Extension du réseau multi-1modal route/ fer, route/ VE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-45	-15	-60
Meilleur service et logistique pour le rail fret	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	90
Priorités aux véhicules de transport public	0	0	0	0	0	-20	0	0	0	0	0	-20
Financement des extensions de transports régionaux rapides	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	12
Accroissement des fréquences, extension des dessertes	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	24
Rationalisation du développement urbain et de l'habitat	0	0	0	0	0	-18	0	0	0	0	0	-18
Extension du stationnement payant	0	0	30	24	0	0	0	0	0	0	0	54
Fixation d'un prix minimum du stationnement	0	0	30	24	0	0	0	0	0	0	0	54
Réduction des espaces habilités au stationnement	0	0	50	40	0	0	0	0	0	0	0	90
Plan de Déplacement Urbain pour les villes > 100 000 h	0	0	0	0	0	-18	0	0	0	0	0	-18
Politique d'implantation pour les industries qui déménagent	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-27	-9	-36
Zones industrielles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-27	-9	-36
Autres												
Investissements pour les bio-additifs aux carburants	0	0	-70	-56	0	-28	-28	0	-70	0	0	-252
Opérations de démonstration des biocarburants (veh. publics)	0	0	0	0	0	-12	0	0	0	0	0	-12
Accords volontaires sur les émissions de CO2 pour les VP	60	90	-300	-240	0	0	0	0	0	0	0	-390
Programmes nationaux d'information du grand public	0	0	-45	-36	0	0	0	0	0	0	0	-81
Programmes d'éducation et de formation	0	0	-45	-36	0	0	0	0	0	0	0	-81
Ensemble du programme	**184**	**285**	**-25**	**-68**	**48**	**82**	**210**	**252**	**1230**	**21**	**31**	**2250**

4.3.5.5 Synthèse de l'évaluation des politiques publiques au regard de la mobilité durable dans les scénarios Hestia

En adossant la réduction des émissions de CO2 sur un système de quotas, les pouvoirs publics choisissent une option dont la garantie de résultat est très forte.
Le tableau ci-dessous résume les impacts que l'on peut attendre des politiques publiques dans les scénarios Hestia, selon les grands critères retenus dans cette procédure d'évaluation multicritères (cf. méthode exposée plus haut). On rappelle que les chiffres rassemblés dans ce tableau n'ont pas de valeur intrinsèque, mais indiquent la direction et la force relative des impacts selon les critères retenus.

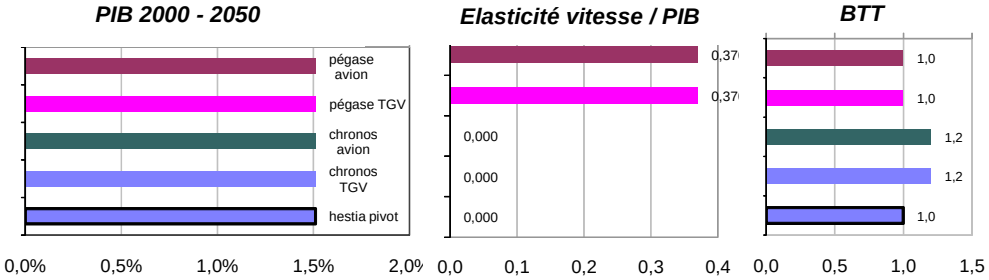
Tableau 34 : Synthèse des impacts des politiques publiques dans Hestia

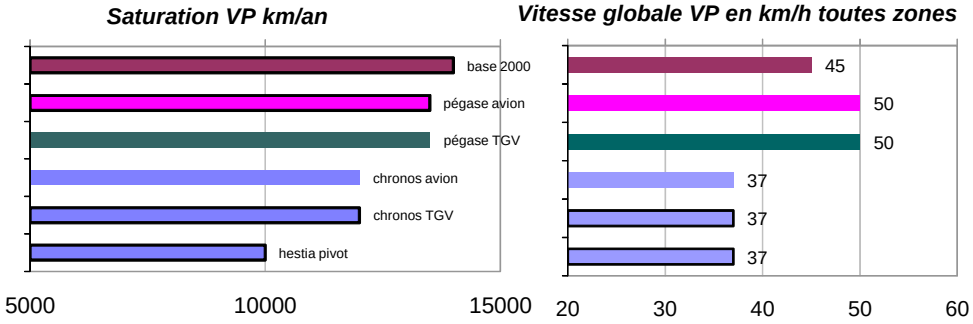
Résultats	HESTIA
Acteurs	-4336
Prix/coûts	2250
Objectifs TEV	9724
technologie	2419
demande	7305

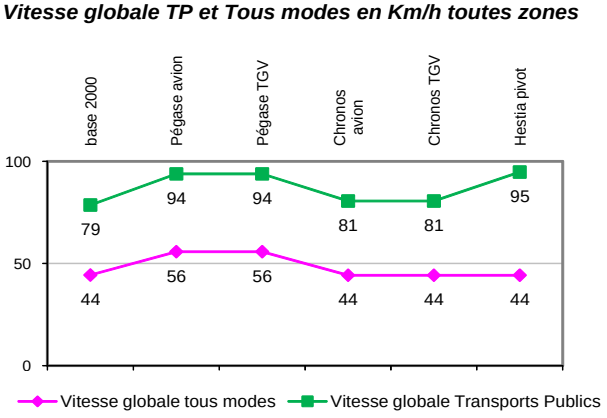
Hestia mobilise une panoplie d'instruments plus limitée que Chronos, et donc sa probabilité d'atteindre le facteur 4 semble moindre que dans Chronos. En revanche son acceptabilité sociale, économique et politique apparaît plus forte.

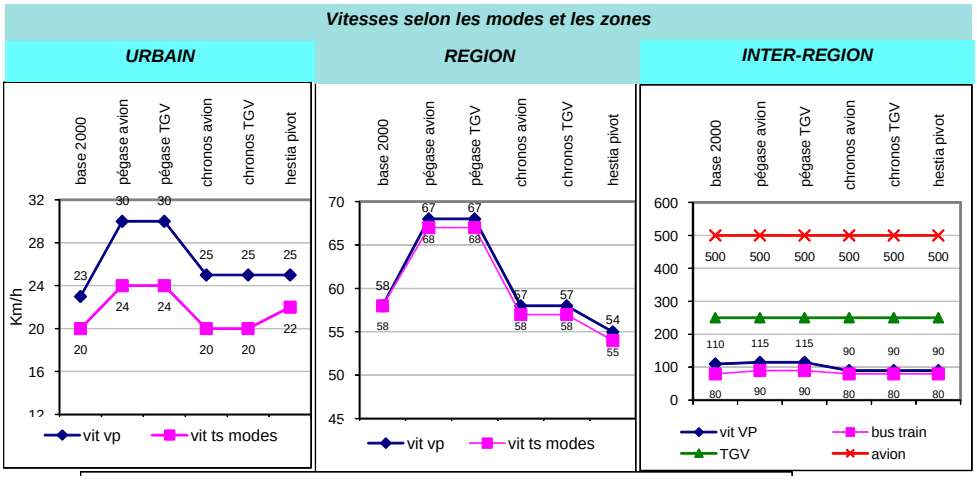
4.4 Comparaison synoptique des scénarios

Passagers
Hypothèses structurantes
PIB, Budget Temps, Elasticité vitesse/PIB, Kilométrage de saturation VP, Vitesses globale et modales



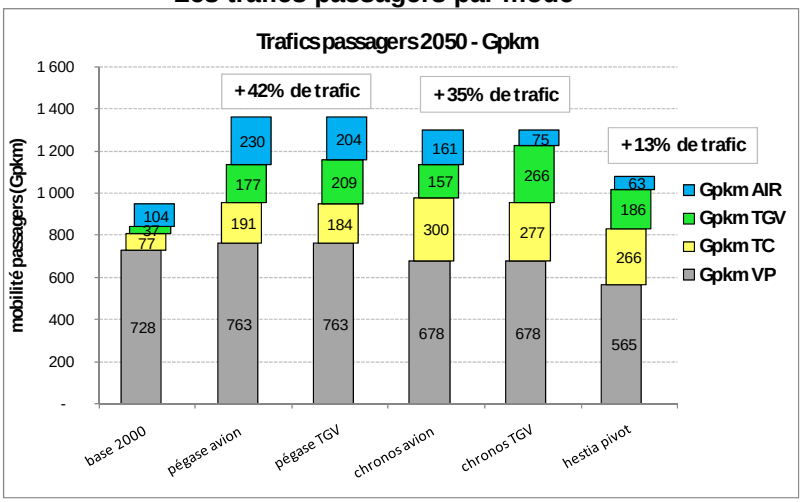


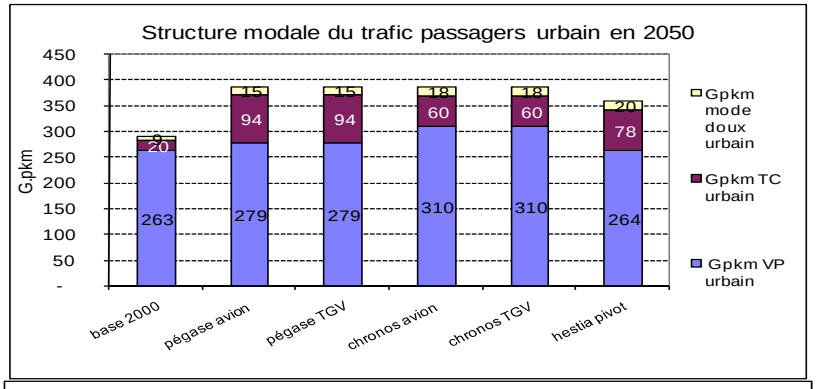


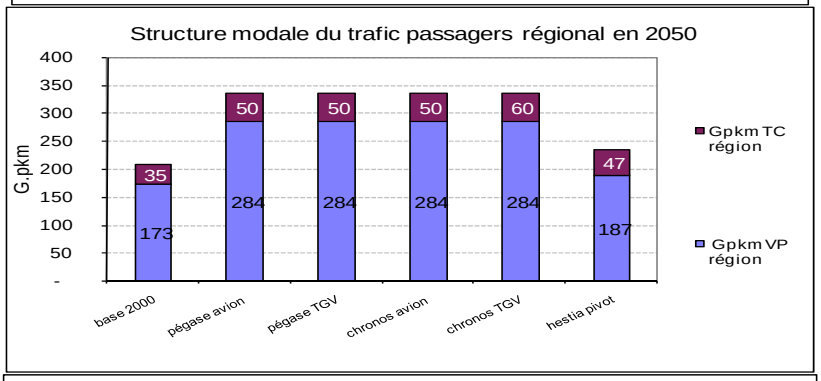


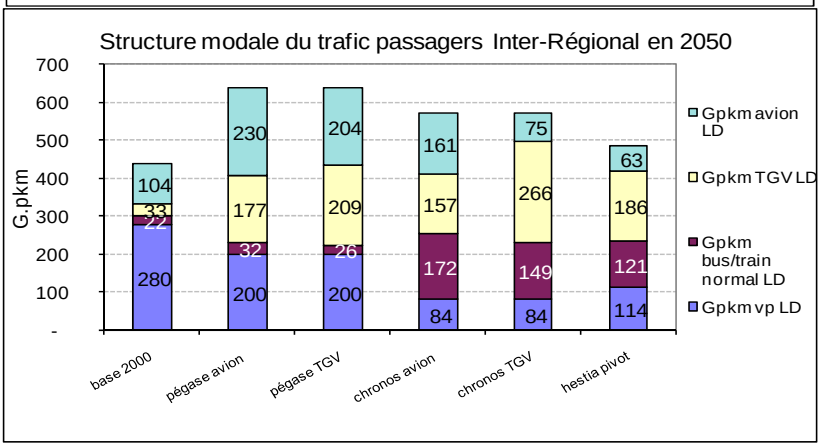
Passagers
Trafics passagers totaux, par zone et par mode

Les trafics passagers par mode



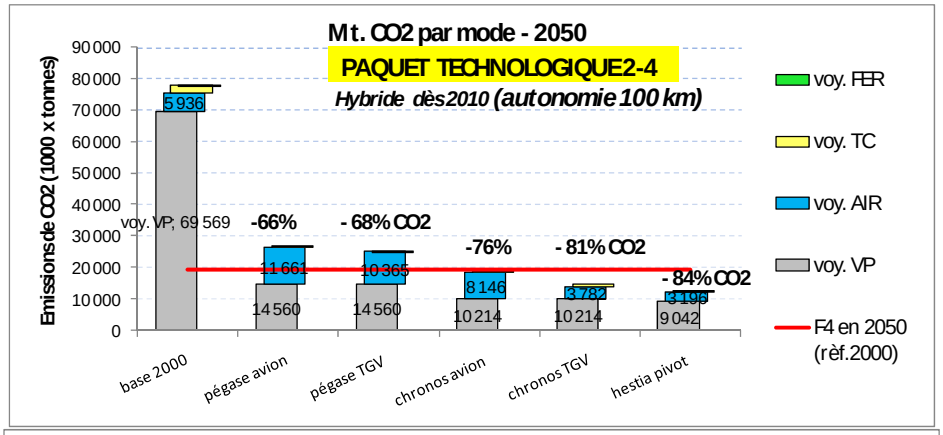


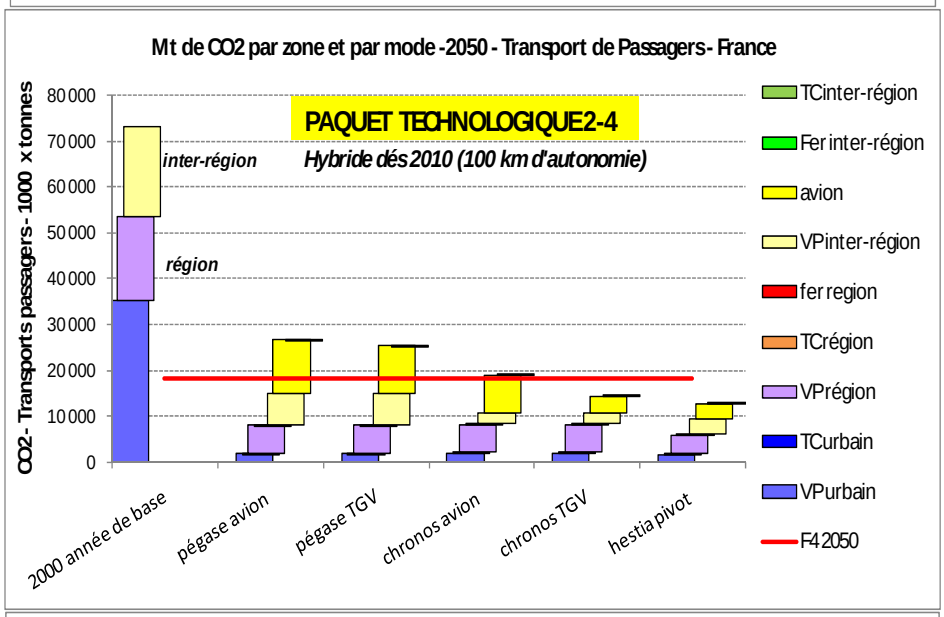


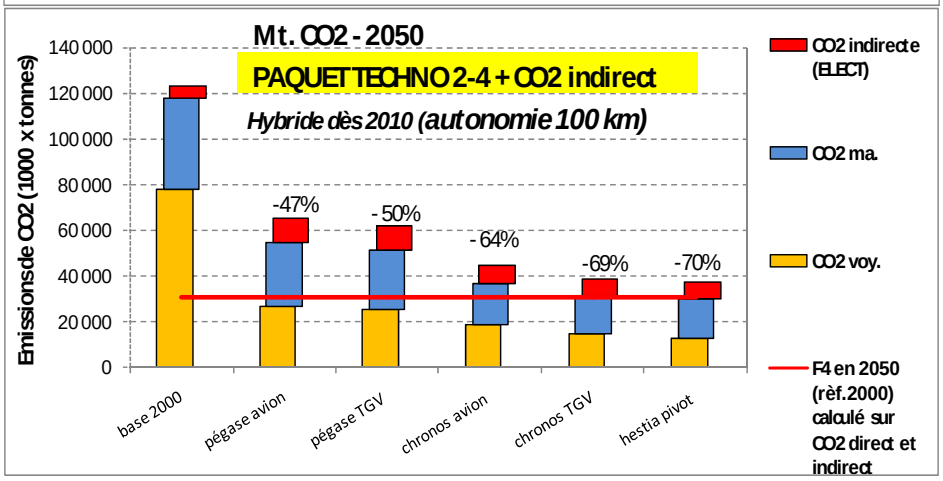


Passagers

CO2 passagers pour les différents scénarios et le paquet technologique 2-4 selon zones et en intégrant les émissions indirectes







Scénarios Passagers : tableau récapitulatif
Hypothèses structurantes, Trafics par zone et mode, Vitesses par zone et modes

		2050	2050	2050	2050	2050
	base 2000	**pégase avion**	**pégase TGV**	**chronos avion**	**chronos TGV**	**hestia pivot**
PIB		1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%
POP		67	67	67	67	67
élasticité vitesse/PIB		0,370	0,370	0,000	0,000	0,000
btt	1	1,0	1,0	1,2	1,2	1,0
km Vp / an	14000	13500	13500	12000	12000	10000
vit vp globale	**45**	50,0	50,0	37,0	37,0	37,0
TOTAL gpkm	**959,4**	**1361**	**1361**	**1296**	**1296**	**1080**
dt modes individuels	728	*763*	*763*	*678*	*678*	*565*
dt collectif route	41	*40*	*39*	*61*	*57*	*54*
dt Fer (hors TGV)	45	*136*	*131*	*221*	*203*	*192*
TGV	37	*177*	*209*	*157*	*266*	*186*
dt air	104	*230*	*204*	*161*	*75*	*63*
dt modes doux	9	*15*	*15*	*18*	*18*	*20*
gpkm URBAIN	**283**	**388**	**388**	**388**	**388**	**361**
% vp	93%	72%	72%	80%	80%	73%
modes doux	0	4%	4%	5%	5%	5%
tc	7%	24%	24%	15%	15%	22%
vitesse vp	*23*	*30*	*30*	*25*	*25*	*25*
vitesse ts modes	*20*	*24*	*24*	*20*	*20*	*22*
gpkm REGION	**208**	**334**	**334**	**334**	**334**	**234**
vp	83%	85%	85%	85%	85%	80%
ts modes	17%	15%	15%	15%	15%	20%
vitesse vp	58	68	68	58	58	55
vitesse TM	58	67	67	57	57	54
INTER REGION	**363**	**639**	**639**	**574**	**574**	**485**
vp	77%	31%	31%	15%	15%	24%
bus / train normal	6%	5%	4%	30%	26%	25%
tgv	9%	28%	33%	27%	46%	38%
avion	8%	36%	32%	28%	13%	13%
vitesse vp	110	115	115	90	90	90
vitesse bus train normal	80	90	90	80	80	80
vitesse tgv	250	250	250	250	250	250
vitesse avion	500	500	500	500	500	500
kpkm/hab	14,7	**20**	**20**	**19**	**19**	**16**
urbain	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,4
Régional	3,2	5,0	5,0	5,0	5,0	3,5
Longue distance	5,7	10	10	9	9	7

Marchandises
Hypothèses structurantes
Elasticité vitesse/PIB, Elasticité trafics/PIB, Vitesse globale et vitesses modales

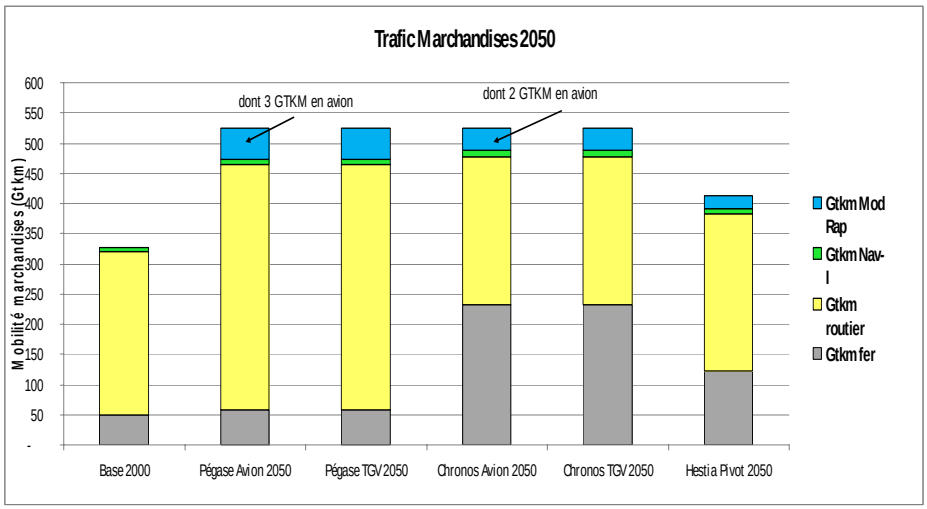
	2000	Pégase 2050	Chronos 2050	Hestia 2050
Vitesse route-Intérieur	50 km/h	60 km/h	52 km/h	52 km/h
Vitesse du rail-Intérieur	40 km/h	40 km/h	40 km/h	40 km/h
Vitesse du rail et modes rapides	40 km/h	63 km/h	45 km/h	45 km/h
Vitesse du l'ensemble du transport Intérieur	43 km/h	54 km/h	43 km/h	43 km/h
Elasticité vitesse/PIB		0,3	0	0
Elasticité T.Km/GDP intérieur		0,63 sur toute la France	0,63 sur toute la France	0,33 sur toute la France
Elasticité T.Km/commerce extérieur		1,6	1,6	0,25

Marchandises
Trafics marchandises intérieurs totaux, par zone et par mode, CO2

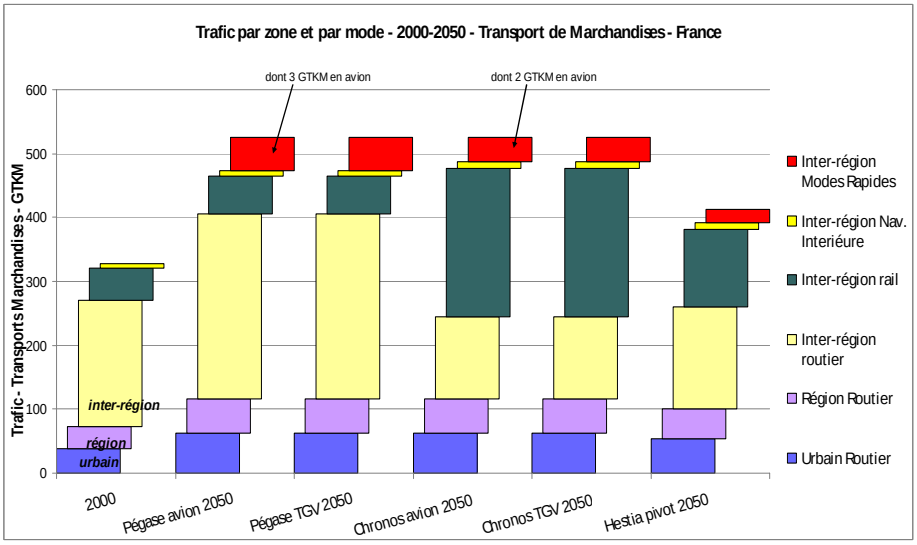
Trafic Intérieur de marchandises dans les différents scénarios

GTKM	2000 année de base	pégase avion	pégase TGV	chronos avion	chronos TGV	hestia pivot
URBAIN	39	**62**	**62**	**62**	**62**	**54**
REGION	34	54	54	54	54	47
INTER-REGION	254	408	408	408	408	312
Total	**327**	**525**	**525**	**525**	**525**	**412**
URBAIN Urbain routier	39	62	62	62	62	54
REGION Région routier	34	54	54	54	54	47
INTER-REGION	254	408	408	408	408	312
Inter-région routier	197	288	288	128	128	160
Inter-région rail	50	59	59	232	232	122
er-région Nav. Intérieure	7	10	10	10	10	10
r-région Modes Rapides	-	51	51	38	38	20
dont ferroviaire rapide		49	51	36	38	20
dont avion		3	-	2	-	-

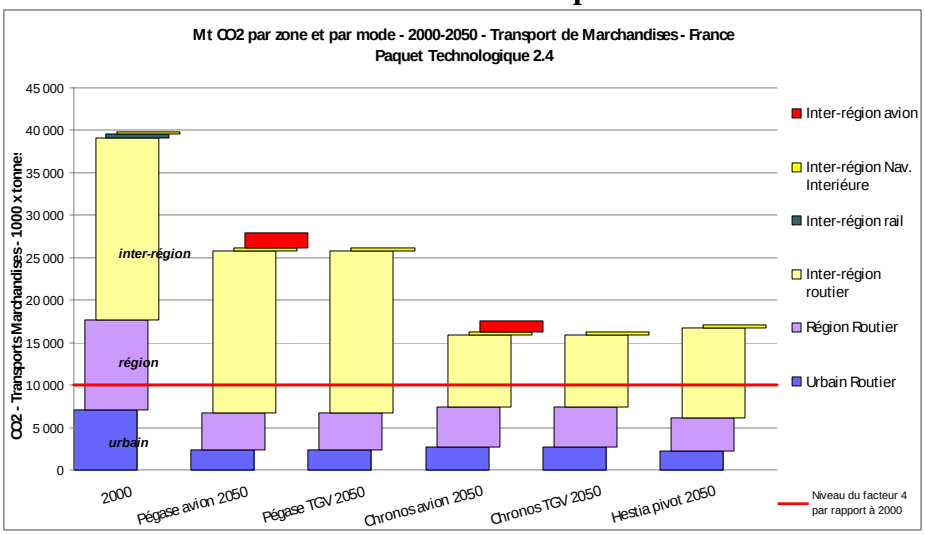
Trafic Marchandises selon les modes



Trafic Marchandises selon les modes et les zones

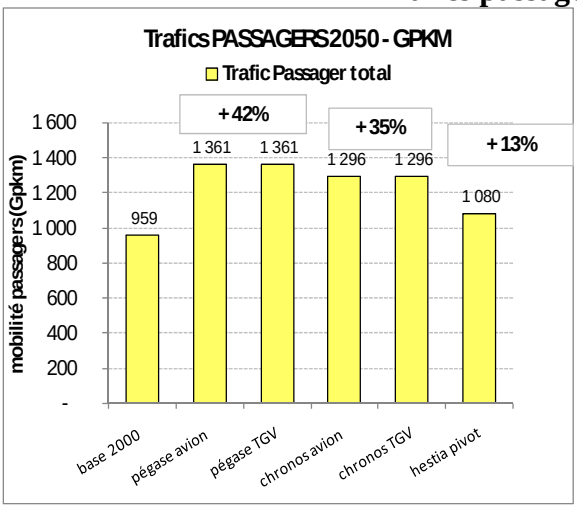


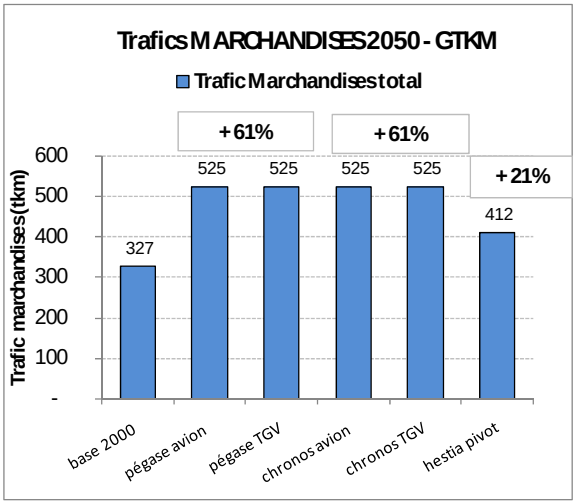
Les émissions de CO2 du transport de marchandises



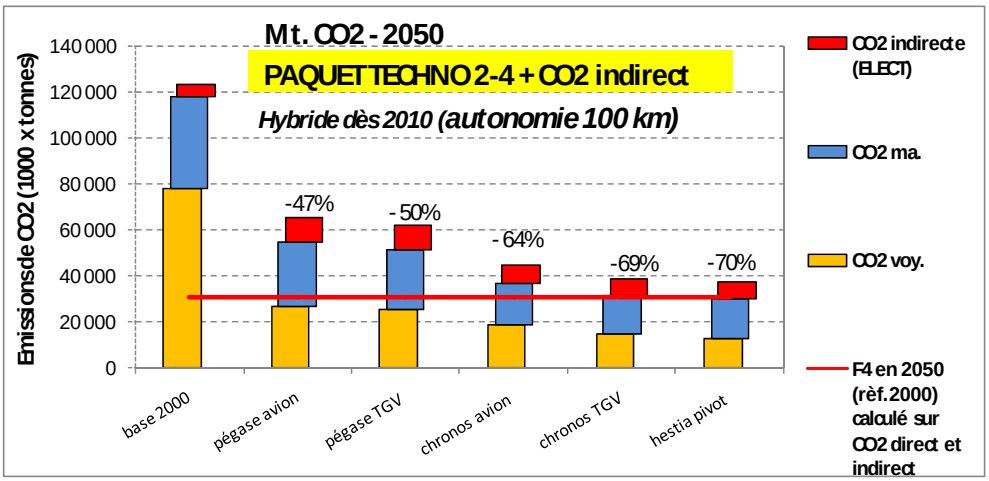
Ensemble du transport
Trafics totaux (Passagers et Marchandises), par zone et par mode

Trafics passagers et marchandises





Emissions directes et indirectes de CO2



5 Conclusion générale : Mobilité durable et politiques publiques, les enseignements des scénarios

En quoi un exercice de prospective peut-il aider les politiques publiques ? La réponse naïve consistant à croire que les décisions jugées nécessaires par les experts vont spontanément se concrétiser dans les choix collectifs doit évidemment être écartée. Mais ce n'est pas une raison pour perdre de vue les points de tangence, sinon de convergence, entre les décisions politiques et les recherches en général, et la prospective en particulier. La notion de « facteur 4 » est encore peu répandue dans l'opinion publique et chez les élus, mais celle de développement durable est désormais ancrée dans tous les discours. Dans ce cadre se popularise l'idée que la progression de la mobilité se heurte, ou se heurtera, à des contraintes croissantes. C'est en ce sens qu'il faut comprendre le consensus relatif qui s'est manifesté dans le cadre du groupe de travail n°1 du Grenelle de l'environnement. Ce résultat a pu surprendre.

- Nous allons dans un premier temps montrer qu'il est finalement assez logique. Il ne fait que confirmer des tendances anciennes qui se sont nettement concrétisées en France dans les années 2000. Des tendances qui ont servi de base à la construction de nos scénarios car elles sont à la fois le fruit de la progression continue de la mobilité (*i.e.* le fameux « couplage » entre croissance économique et mobilité) et le signe d'inflexions, voire de ruptures.
- Ce sont ces inflexions, puis ces ruptures qui serviront de trame à notre seconde partie. Elles interpellent en effet les politiques publiques qui vont devoir s'adapter et accompagner les changements plus ou moins spontanés, plus ou moins aisés, dans les flux de passagers et de marchandises. Nous insisterons sur les défis les plus délicats, ceux qui s'inscriront plus dans une logique de rupture que dans la continuité des tendances. Lorsque l'on se donne un horizon de plus de quarante ans, ce ne doit pas être pour repousser le plus possible certaines décisions difficiles. C'est tout au contraire, comme le veut le principe du backcasting, et comme l'a rappelé le rapport Stern, pour que les choix pertinents soient faits dès maintenant, alors qu'ils sont les moins coûteux car ils anticipent les ruptures.

5.1 Comprendre les tendances émergentes

En première analyse, les comportements de mobilité n'ont pas connu en France d'inflexion majeure au cours des dernières années. Le transport routier continue à occuper le devant de la scène. L'achat d'une automobile reste un acte majeur. Il s'est vendu en 2007 près de 2 millions de voitures neuves et plus encore de voitures d'occasion. Dans le même temps, se confirme la progression des trafics aériens et TGV, mais aussi, ce qui est déjà plus inhabituel, celle des TER et même des transports collectifs urbains. Un examen plus complet découvre ainsi des mouvements de fond plus inattendus, qui révèlent que derrière l'apparente continuité des tendances, se profilent des changements de structure qui, dans les années à venir, seront autant de défis pour les politiques publiques.

5.1.1 Mobilité : par petites touches, un paysage profondément transformé

Commençons par un inventaire « à la Prévert ». Sans aller jusqu'au « raton laveur », rassemblons pêle mêle un certain nombre d'événements, de faits saillants dont la juxtaposition va peu à peu se révéler porteuse de sens.

- Depuis 2000, le nombre de morts sur les routes a été pratiquement divisé par deux. Le nombre de blessés graves a diminué de 30%.
- La mise en place de radars automatiques, le renforcement des contrôles et sanctions a conduit à une baisse des vitesses routières moyennes et surtout maximales.
- En 2006, les vitesses maximales sur route et autoroutes ont été abaissées pour tous les véhicules de plus de 3,5 tonnes, ce qui a allongé les temps de parcours moyens.
- Le respect des limitations de vitesse, par les VL et les PL, est de plus en plus la règle, tant en zone urbaine que sur autoroute.
- Le trafic routier automobile s'est stabilisé puis a connu une légère baisse en France depuis le début des années 2000. Il ne continue sa progression que sur certains tronçons autoroutiers, et dans les zones péri-urbaines des grandes agglomérations.
- La diésélisation du parc automobile se poursuit, conduisant à une baisse moyenne de la consommation des véhicules.
- Les ventes totales de carburant ont baissé en France depuis le début des années 2000.
- Le prix des carburants à la pompe a progressé de près de 75% depuis 1999.
- Les recettes provenant de la TIPP baissent en France depuis deux ans du fait de la diminution des volumes consommés.
- De 2000 à 2006, le trafic ferroviaire de fret a baissé de 20%, passant de 50 à 40 milliards de tonnes kilomètres.
- Dans le même temps, le trafic de fret routier a continué sa progression, même si on a pu observer un net rebond du trafic fluvial, notamment le trafic de conteneurs.
- Dans le même temps le trafic TGV connaît une progression soutenue (5% par an) qui ne se dément pas malgré une hausse des tarifs légèrement supérieure à l'inflation.
- Il en va de même pour le trafic aérien (surtout international) qui progresse malgré les ajustements à la hausse des prix des billets, suite à la répercussion par les compagnies aériennes de la hausse des prix du pétrole.
- Les récentes « Enquêtes ménages » conduites en France, notamment à Lille et à Lyon, montrent une régression sensible du trafic automobile dans la partie centrale de l'agglomération.
- Dans de nombreuses agglomérations, les zones de stationnement payant sur voirie ont été étendues et les contrôles ont été renforcés.
- Le contrôle technique obligatoire a rendu plus coûteux l'entretien des automobiles ce qui n'a été que partiellement compensé par la stabilisation, ou la hausse réduite des cotisations d'assurance.
- Une hausse d'autant plus réduite que le parc a continué à se déformer au profit des véhicules plus lourds et plus puissants, nonobstant le succès de quelques véhicules à bas prix.
- Compte tenu des progrès techniques, cette montée en gamme n'empêche pas, mais elle limite sensiblement, la réduction des consommations unitaires moyennes.

Arrêtons nous sur ce dernier phénomène car il est emblématique d'un certain strabisme des politiques publiques. Ainsi, face aux enjeux du changement climatique, les discours officiels du début des années 2000, comme ceux issus du Grenelle de l'Environnement, ont insisté sur la nécessité de mettre au point des véhicules propres et sûrs. Après la pollution et le

bruit, les émissions de CO_2 et l'insécurité routière sont devenues les cibles privilégiées des politiques publiques. Ainsi, en 2003, les priorités définies en 2001 pour le PREDIT 3 ont-elles été infléchies en faveur du programme VPES (véhicule propre, économe et sûr). Il n'y a là bien sûr rien que de très logique, mais cette insistance sur les aspects techniques masque le fait que, dans la réalité, à terme beaucoup plus rapproché et de façon immédiatement sensible pour les usagers, les politiques publiques ont de fait regardé ailleurs. Par petites touches, comme insensiblement, elles se sont lancées, sans le dire explicitement, et peut-être même sans s'en rendre compte dans une politique de rationalisation, et dans certains cas de rationnement, de l'usage de route. Les mesures phares ont été ici les limitations de vitesse, et la mise en place d'un véritable contrôle-sanction. La peur du gendarme est ainsi venue s'ajouter aux effets délétères de la congestion et de la densification des trafics pour affadir l'usage de l'automobile. N'oublions pas les mesures plus discrètes, mais non moins efficaces pour contraindre les usagers de l'automobile : la multiplication des ronds points, les ralentisseurs et autres chicanes, la réduction des vitesses en divers points sensibles du réseau, et pas seulement dans les agglomérations…

Et comme pour aggraver l'impression d'une « fin de partie », le marché pétrolier s'en est mêlé. Il a réussi à faire ce que les écologistes n'osaient envisager dans leurs rêves les plus secrets : un quasi-doublement des prix des carburants en moins de dix ans, soit une progression trois fois supérieure à l'inflation et plus de deux fois supérieure au pouvoir d'achat. Au total, la baisse des vitesses moyennes d'une part et la hausse des coûts d'autre part ont conduit à une **sensible hausse du coût généralisé de l'usage de l'automobile**. Or, ce résultat est exactement celui que préconise l'analyse économique face aux contraintes environnementales, économiques et spatiales que fait peser sur la collectivité l'immense succès de l'automobile (cf encadré).

La logique contre-intuitive d'une hausse des deux termes du coût généralisé

….même là où la massification des flux rend possible et même nécessaire le transport collectif, on se rend compte que les déplacements en voiture particulière progressent plus vite. La simple prolongation des tendances à l'horizon 2020 ne fait qu'amplifier le phénomène en lui donnant des dimensions qui suffisent à souligner la probable non soutenabilité du phénomène, témoignant d'une idée simple : une politique de déplacements qui voudrait infléchir les tendances devrait prendre non pas une seule mesure (réduction des vitesses <u>ou</u> tarification des déplacements) mais bien plutôt une batterie de mesures où réduction des vitesses <u>et</u> tarification des déplacements iront de pair.

Ce couple tarification - moindre vitesse, inattendu si l'on s'en tient à la logique de la tarification de la congestion, n'est pas si incongru qu'il y paraît si l'on veut bien considérer que la raison économique peut prendre des formes diverses.

- Dans une perspective de développement de la mobilité, il est évident qu'une tarification plus élevée se justifie quand il y a un gain de vitesse. A l'intérieur du coût généralisé du déplacement (coût monétaire plus coût en temps), les deux mouvements se compensent, même si c'est inégalement. Le succès du TGV ou la croissance des voyages en avion en sont une illustration d'autant plus forte que la valeur du temps progresse avec les revenus.
- Dans une logique cherchant une stabilisation, voire une réduction de la mobilité, il devient légitime que les deux composantes du coût généralisé du déplacement évoluent dans le même sens, vers un accroissement du coût total. Si une telle perspective paraît inacceptable du strict point de vue individuel, elle a un sens si elle s'insère dans un projet urbain….

Y. Crozet[31] et G. Marlot, *Péage urbain et ville « soutenable » :figures de la tarification et avatars de la raison économique*, Cahiers scientifiques du transport, n°40, 2001, p.104

Contrairement à ce que pourraient penser les amoureux de la voiture, cette « double peine » imposée aux automobilistes n'est pas le fruit d'une haine viscérale de l'automobile, tout juste bonne à servir de vache à lait fiscale. C'est tout simplement le fruit de son immense succès qui pose à la collectivité un problème essentiel et rarement abordé : celui de la consommation d'espace. Il suffit pour s'en convaincre de se rappeler que dans les grandes agglomérations, en heure du pointe du matin, la plus tendue, les véhicules en circulation ne représentent jamais plus du quart du nombre total de véhicules immatriculés dans la zone. En d'autres termes, les zones urbaines et péri-urbaines, mais aussi les zones touristiques et certains axes (vallées alpines, vallée du Rhône…) sont régulièrement submergés par le flot des automobiles. Un flot que l'on ne semble plus pouvoir contenir puisque toute nouvelle infrastructure dans ces zones de fort trafic accentue la demande et suscite en d'autres points du réseau les effets de congestion que l'on a combattus en un point.

Le fait marquant du début du XXIème siècle est donc, en France, l'obsolescence relative de l'automobile. Si les services qu'elle nous rend restent importants, le fait nouveau est que, pour certains types de déplacements, recourir à la voiture est de moins en moins évident. Plus précisément, la zone de pertinence de l'automobile est réduite sur ses marges.

- Pour les courtes et moyennes distances, notamment en zone urbaine, elle se heurte à la saturation de la voirie et au casse-tête du stationnement. La marche à pied, le vélo et les transports en commun offrent de plus en plus souvent des options alternatives crédibles.
- Pour les longues distances, le TGV d'une part et l'avion d'autre part rendent de plus en plus insupportables les grandes migrations automobiles. Au point que nos programmes d'activités se modifient petit à petit. La destination de nos vacances change, la localisation des firmes et des résidences aussi. Les unes et les autres recherchent de plus en plus la proximité des gares TGV ou des aéroports.

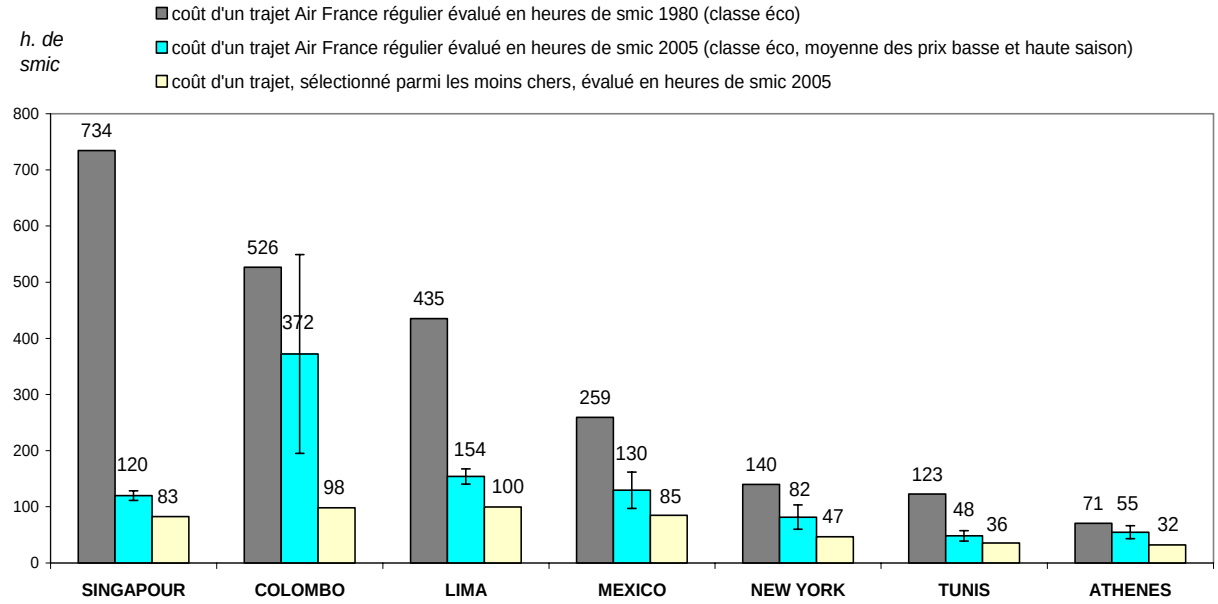
Ainsi, la permanence du paysage offert par les comportements de mobilité n'est qu'apparente. La poursuite de la tendance séculaire à la hausse de la mobilité se fonde en réalité sur de constants changements de structure. Les parts modales se modifient progressivement et nos attentes changent à l'égard des politiques publiques, qui doivent en prendre conscience.

5.1.2 Les politiques publiques et le coût généralisé : des pratiques différenciées

Pour hâter cette prise de conscience, passons de l'inventaire à l'analyse. La collection de faits présentée ci-dessus mérite d'être resituée dans un cadre capable d'ordonner les évolutions constatées pour leur donner du sens. Pour cela, revenons à une notion chère aux économistes du transport : le coût généralisé et ses deux composantes, monétaires et temporelles. Si, pour l'automobile, nous observons depuis le début des années 2000 un accroissement des deux composantes du coût, le prix et le temps passé, il n'en va pas de même pour les autres modes. Même si le transport aérien a souffert de la hausse des prix du kérosène, et des contraintes liées à la sûreté et à la massification, il continue à offrir une vitesse moyenne de déplacement élevée pour un prix encore très accessible, ce dont

[31] Voir aussi Y. Crozet, « Pour une vision déniaisée de la tarification de la mobilité » in Cahiers du Conseil général des Ponts et Chaussées, n°7 – janvier 2003, pp. 34-38

témoignent la hausse des trafics et l'ouverture permanente de nouvelles lignes, notamment par les compagnies « low cost ». Le graphique ci-dessous illustre, sur 25 ans, la sensible baisse du prix d'un billet d'avion exprimé en heures de travail d'un smicard



Extrait du travail de thèse "Optimisation Spatio-Temporelle des Déplacements Touristiques", v. Bagard, LET 2005

Dans le même temps, l'extension du réseau TGV élargit l'accès à la grande vitesse ferroviaire, même si le prix du billet est plus élevé que pour les trajets en train Corail. Ainsi, les politiques publiques sont-elles confrontées à de nouvelles demandes. Alors que les projets de nouvelles autoroutes et autres contournements routiers se heurtent à des résistances de plus en plus vives de la part des riverains et des élus, une forte demande sociale se manifeste en faveur des nouvelles lignes à grande vitesse. Il en va de même pour le transport aérien, mais de façon plus discrète car les besoins de financement public n'ont pas la même intensité. Face aux inflexions de la demande sociale d'une part et compte tenu de l'obsolescence relative de la route d'autre part, les politiques publiques s'orientent vers des traitements différenciés. Tenant compte des saturations relatives des différents modes, elles découragent ou encouragent leur développement.

- Pour le transport routier privé, de voyageurs comme de marchandises, en zone urbaine comme pour les trajets régionaux, nationaux ou internationaux, l'orientation est la même : décourager l'usage de la route par la tarification au coût généralisé sous forme de réduction des vitesses d'une part et de hausse des prix relatifs d'autre part (stationnement, prix des carburants, péages).
- Les transports publics ne sont pas traités de la même façon, tout est fait au contraire, par une action sur les prix et sur les vitesses, pour encourager les usagers potentiels.
  - Le transport routier de voyageurs bénéficie souvent d'une hausse des vitesses pour l'accès aux zones urbaines, notamment par la mise en place de voies réservées. Les prix des billets et surtout des abonnements demeurent faibles. De plus en plus souvent, les départements, en charge des transports locaux, pratiquent une tarification plate qui est une forme classique de subvention à la mobilité.
  - En ce qui concerne les TER et autres transports sur rail en site propre, les mêmes tendances sont à l'œuvre. La plupart des agglomérations et des régions ont mis en

place des systèmes de tarification offrant de sensibles réductions. Dans la mesure du possible, elles s'efforcent également, d'améliorer les vitesses moyennes des trains et autres tramways, ou à tout le moins d'accroître les fréquences et le confort, et de réduire les incertitudes par le cadencement.

- Les trains à grande vitesse offrent un spectacle un peu différent. Là aussi, on encourage le développement grâce à une offre de plus en plus étoffée. En outre, la vitesse moyenne s'accroît : 260, puis 300, 320 et dans quelques années 350 km/h. Le coût temporel se réduit donc par étape. En écho à cette amélioration du service, le prix du billet progresse, même si le « yield management » permet à certains de bénéficier de prix très attractifs. L'encouragement ne se fait donc pas directement par la voie tarifaire, car les TGV ont un point commun avec les transports en commun en site propre, ils nécessitent d'importantes subventions publiques lors de l'investissement initial. Au point que l'AFITF, chargée de financer les projets d'infrastructure, fait remarquer que la plupart des projets qu'elle finance sont des projets ferroviaires, alors que la majeure partie de ses recettes provient de la route.
- Pour le transport aérien, les subventions publiques sont faibles, voire inexistantes. Une taxe spéciale a même été mise en place en France en 2006 pour financer l'aide aux pays du Tiers Monde. Mais on ne peut pour autant parler de volonté de décourager l'usage du transport aérien. C'est même plutôt le contraire qui est vrai si l'on prend en compte la non-taxation du kérosène, les investissements dans les aéroports et les aides aux compagnies après les attentats du 11 septembre 2001.

Au total, les incitations et désincitations à la mobilité sont très ciblées. Ce qui vaut pour certains modes et certains lieux (la VP en zone urbaine) ne vaut pas pour d'autres (les TCSP, les TGV). Une fois ces différences repérées, les politiques publiques font preuve d'une certaine cohérence. Les signaux envoyés aux usagers se différencient de la façon suivante :

- Le transport routier, de voyageurs et de marchandises ne devrait plus progresser. Il est donc nécessaire de le soumettre à une « double peine » que résume une formule simple : **moins rapide, plus cher** !
- Les transports publics de voyageurs, notamment urbains et interurbains, se trouvent dans une position symétrique : **moins cher et plus rapide** (modestement).
- Les TGV offrent encore une autre combinaison : **plus rapide et plus cher**. La hausse tendancielle du prix des billets étant justifiée par la hausse du prix des péages ferroviaires, laquelle n'empêche pas la mobilisation de subventions d'investissements.
- Le transport aérien de voyageurs est dans une situation mouvante. Si, depuis une vingtaine d'années, il offrait aux passagers le rêve absolu en matière de mobilité, « **plus rapide et moins cher** », des contraintes nouvelles se font jour, qui remettent en cause la tendance à la baisse des prix.
- En ce qui concerne le fret, on retrouve les mêmes combinaisons, mais moins marquées.
  - Le fret routier (**plus cher, un peu moins rapide**) voit son prix augmenter depuis quelques années en monnaie constante (prix des carburants, péages, coût salarial…). C'est une situation nouvelle qui n'a pour l'instant pas conduit à une perte significative de parts de marché[32]. Les vitesses routières et autoroutières moyennes des camions ont été peu affectées par les nouvelles réglementations et la réorganisation des flux a permis d'y faire face.
  - Mises à part quelques niches, le fret ferroviaire (**moins cher mais pas plus rapide**) reste peu compétitif en rapidité et en fiabilité. Au point qu'il semble impossible

[32] Il y a eu par contre nouvelle répartition des parts de marché de la route entre transporteurs français et étrangers, au profit de ces derniers.

d'accroître les péages spécifiques du fret, pourtant inférieurs aux coûts marginaux. L'entrée de concurrents de la SNCF tire aujourd'hui vers le bas les prix du fret ferroviaire, mais la fiabilité reste trop incertaine.

- Le fret aérien (**cher mais très rapide**) continue son développement, essentiellement dû à la croissance de la valeur ajoutée par tonne des produits transportés. Les prix ne diminuent plus et la vitesse est stabilisée, mais les avantages comparés du fret aérien sont tels par rapport aux autres modes qu'il étend mécaniquement sa part de marché, faible en volume (0,15% des tonnages), mais non négligeable en valeur (15%).
- Le fret maritime (**peu rapide mais fiable et peu cher**) continue lui aussi sa progression en lien avec l'accélération de la division internationale du travail. Son point fort est la massification qui permet des coûts unitaires faibles à la tonne-kilomètre. La hausse des prix constatée depuis quelques années n'a pas dissuadé la demande, laquelle a aussi profité au trafic fluvial de conteneurs.

5.2 De l'accompagnement des inflexions à l'anticipation des ruptures

Plus rapide ou moins rapide ? Plus cher ou moins cher ? les diverses combinaisons que nous venons d'observer sont moins le signe d'une volonté propre des politiques publiques que le fruit d'un accompagnement des tendances structurelles de la mobilité. La diffusion de l'automobile et ses performances relatives sont arrivées à un point de leur histoire où il est nécessaire de leur trouver, au moins pour partie, des substituts. La question qui se pose maintenant est donc de savoir si ces mesures d'accompagnement vont dans le sens du « facteur 4 », et avec suffisamment d'ambitions. Pour réduire de 75% les émissions de CO_2 à l'horizon 2050, ce rapport a montré que d'importants changements devaient voir le jour dans les comportements des ménages et des entreprises. La simple poursuite des politiques actuelles semble dès lors insuffisante. C'est ce que nous allons montrer en soulignant que si les inflexions récentes sont intéressantes, notamment celles qui ont suivi le Grenelle de l'environnement, d'autres changements, plus radicaux, seront sans doute nécessaires. Il faut s'y préparer.

5.2.1 De la consommation d'espace aux contraintes climatiques : affirmer la nouvelle donne des politiques publiques

Les deux phénomènes marquant de l'évolution de la mobilité depuis le début du XXIème siècle ne sont pas, comme on le croit parfois, liées aux contraintes du changement climatique. Ainsi que nous l'avons rappelé, les exigences croissantes qui pèsent sur l'automobile proviennent essentiellement de sa forte consommation d'espace, et d'une hausse des prix du pétrole qui ne résultent pas des craintes liées à l'effet de serre. Dans le même ordre d'idées, le développement du transport aérien comme de la grande vitesse ferroviaire ne fait que confirmer qu'il existe une élasticité non nulle entre l'accroissement de la vitesse moyenne des déplacements et la progression du PIB. Une partie des mesures annoncées dans le cadre du Grenelle de l'environnement ne fait donc que répondre à cette demande de vitesse croissante tout en intégrant l'obsolescence relative de l'automobile. Mais ce faisant, elles ouvrent aussi la porte à la prise en compte d'autres objectifs. L'extension du réseau TGV et les soutiens aux transports publics urbains peuvent aussi, comme le ralentissement des programmes autoroutiers, s'inscrire dans une **réponse cohérente de premier niveau** à l'horizon facteur 4 en 2050. Pour le montrer, prenons quelques exemples.

a) Les dépenses de recherche pour les économies d'énergie

Un des premiers enseignements de nos scénarios est que le progrès technique peut nous aider à accomplir la moitié du chemin dans la perspective du facteur 4. C'est loin d'être négligeable. A ce titre, il est logique que le Grenelle de l'environnement ait insisté sur la recherche en matière de VPES. Une des conclusions de notre rapport est importante en ce sens qu'il pointe les technologies nécessaires pour que le facteur 2 soit atteint. Les seules améliorations incrémentales attendues sur les moteurs à combustion interne sont insuffisantes. Compte tenu du fait que l'automobile va rester un mode de transport important, il est nécessaire, pour atteindre le facteur 2 par la technologie, de mettre en œuvre des motorisations hybrides rechargeables, ou tout électrique. Pour cela, les investissements publics et privés dans le domaine de la recherche doivent être en partie réorientés. Les constructeurs français ont longtemps privilégié la filière « diesel », non sans un certain succès. Les récents accords industriels passés par Renault en Israël, ou par EDF avec Toyota, montrent que les priorités doivent changer. Nous arrivons ainsi à notre première recommandation : **Les automobiles et poids lourds doivent se voir fixer des objectifs d'émission de C02 beaucoup plus ambitieux que ce que les constructeurs automobiles négocient actuellement avec l'Union européenne**.

b) Les choix en matière d'infrastructures de transport : lier investissement et tarification

Les contraintes liées à la sécurité routière, la rareté de l'espace dans les zones urbaines et touristiques, la progression de la congestion… beaucoup d'éléments nous incitent à réorienter nos programmes d'activités, professionnels et de loisirs, vers des mobilités recourant au TGV et à l'avion mais aussi, en zone urbaine ou péri-urbaine, aux TER et aux transports collectifs en site propre. En ce sens, l'annonce de la construction de 2000 km de nouvelles lignes ferroviaires à grande vitesse, et les aides annoncées pour les transports publics ne sont pas seulement une bonne manière à l'égard de certains élus locaux, de Alstom ou de la SNCF. Le premier objectif est bien de répondre aux besoins croissants de mobilité. C'est la raison pour laquelle les mêmes maires qui s'engagent la main sur le cœur à promouvoir une mobilité durable n'hésitent à défendre pour leurs agglomérations des projets de contournement autoroutier ou de tunnels, qu'il souhaitent faire prendre en charge par l'Etat (ou le département) au nom du détournement du trafic de transit. Grenoble, Lyon, Toulouse, Lille, Bordeaux, Strasbourg…, dans toutes ces villes existent des projets coûteux de nouvelle infrastructure (auto)routière. Sans oublier les projets de nouvelles autoroutes interurbaines : A45, A51, A32, A24… ou d'élargissement des infrastructures existantes.

Il est nécessaire d'introduire un peu de cohérence dans tous ces projets qui viennent s'additionner aux demandes de nouvelles lignes TGV et de développement des TCSP. Pour cela, il est nécessaire de mettre fin à l'ambiguïté de la position des élus qui restent fondamentalement des notables locaux cherchant à convaincre Paris de déverser sur leur circonscription l'argent public. Pour cela, leur responsabilité financière doit être plus importante. C'est de plus en plus le cas pour les lignes TGV nouvelles, mais ce doit l'être aussi pour les projets autoroutiers et aussi pour certaines lignes ferroviaires locales. **Le financement des infrastructures de transport doit être de plus en plus territorialisé. Par la mobilisation des finances publiques locales d'abord, mais aussi par la participation des usagers**.

Le changement fondamental des prochaines années se manifestera par le passage progressif de la route dans le domaine marchand. Activité quasiment régalienne il y a un siècle, au même titre que l'armée, la police ou la justice , la construction et l'entretien des routes jouaient un rôle majeur dans l'unification de la nation. Ce rôle est aujourd'hui dévolu aux systèmes de protection sociale et à l'éducation. **Il est nécessaire que l'éco-pastille (bonus malus selon le degré de pollution des véhicules) se transforme en éco-redevance, payée annuellement et pas seulement à l'achat**. La hausse des prix des carburants interdit de croire que la TIPP restera une vache à lait fiscale. Son rôle relatif doit décliner au profit de péages variables (autoroutiers, routiers, urbains…) et d'une redevance fixe d'usage des infrastructures. La mise en place d'une redevance pour les poids lourds sur le réseau national doit être vue comme une première étape dans cette direction[33].

A l'idée de moratoire autoroutier, nous proposons d'en substituer une autre qui se résume ainsi (seconde proposition) **: En zone urbaine comme pour l'interurbain, pas de nouveau projet autoroutier sans mise en œuvre d'une tarification harmonisée sur le nouvel axe et les axes concurrents !** C'est une douloureuse évidence que viennent de découvrir les Alsaciens qui supportent sur leur réseau autoroutier gratuit le report des poids lourds allemands qui cherchent à échapper au « LKW Maut ». Il faut s'inspirer de cette expérience pour énoncer une règle des tarification étendue. Ainsi, en Lorraine, pas d'A 32 sans mise à péage de l'A31 ; pour les habitants du Nord Pas de Calais, pas d'équilibrage des flux entre A25 et A 26, et pas d'amélioration de l'A25, sans mise à péage des deux infrastructures. Entre Lyon et Saint-Etienne, pas d'A 45 sans mise à péage, ou déclassement, de l'A 47… La même situation s'impose pour les projets urbains, grenoblois, lyonnais, toulousains ou bordelais de contournement autoroutier.

c) Mieux coordonner les politiques de mobilité et libéraliser l'offre de transport public

La cohérence des politiques locales et régionales de mobilité peut être favorisée par la généralisation de la tarification routière. Nécessaire, cette mesure n'est pas suffisante. Elle doit être accompagnée d'une plus nette coordination des politiques de transport, à l'échelle des régions. Il n'est pas sain de voir les départements avoir la haute main sur les routes et certains transports publics routiers alors que les régions s'occupent des TER et les agglomérations des transports publics urbains. La multiplication des autorités organisatrices de transport (AOT)[34] devient en elle même un obstacle à la mise en place de politiques cohérentes. Pour y remédier, de nouvelles lois sont nécessaires. Mais comme leur accouchement risque d'être difficile, pourquoi ne pas expérimenter, c'est notre troisième proposition. **Qu'une région expérimentale se lance dans un plan de cohérence régionale des transports[35]**. L'Alsace, de petite taille et très engagée sur ces questions mériterait d'être cette entité. Elle qui va expérimenter le péage pour les PL, elle qui a obtenu en matière de TER des résultats significatifs, elle dont le président, A. Zeller, vient de proposer un abaissement à 110 km/h de la vitesse autouroutière.

Cette expérimentation doit aussi **être l'occasion de libéraliser l'offre de transport public.** Si les exploitants traditionnels savent améliorer leur offre pour l'accès aux centres

[33] Qui n'a pas compris que plus les automobilistes s'équipent de systèmes de guidage par satellite et plus ils rendent possible, pour tous, la mise en place d'une tarification en temps réel, sur le modèle de ce qui existe déjà pour les poids lourds en Allemagne ?
[34] Plus de 80 AOT en Rhône-Alpes !
[35] S'il faut envisager des compensations pour les départements, pourquoi ne pas leur transférer les lycées en échange des routes et des transports par car ?

villes, pour un coût généralement élevé, ils sont moins performants pour les déplacements en périphérie. Or, il est indispensable qu'une offre à faible coût se mette en place dans ces zones, qui sont aujourd'hui démunies car le transport collectif d'une part et le transport à la demande d'autre part, dans leur format actuel, sont hors de prix.

5.2.2 Les risques climatiques et les autres : préparer les ruptures

Les trois propositions que nous venons de faire sont ambitieuses, mais elles s'inscrivent dans la continuité des tendances passées. Les constructeurs eux mêmes se lancent dans l'hybride rechargeable. La tarification de l'usage de la route est déjà dans l'air du temps, comme la hausse tendancielle des péages ferroviaires. Quant à la coordination des politiques de mobilité, elle figure dans les propositions du Grenelle de l'environnement. Il est pourtant nécessaire d'envisager d'autres pistes, non pour assurer la continuité mais pour préparer les ruptures. Il suffit pour s'en convaincre de considérer les fragilités de nos systèmes de mobilité, fragilité consécutive aux risques auxquels ils sont soumis.

Le risque climatique est une évidence (résistance des infrastructures aux intempéries, contraintes accrues sur l'usage des carburants fossiles…) mais il n'est pas le seul. Un autre risque, plus immédiat, est celui qui se manifeste déjà dans la hausse continue des prix du pétrole. A quoi il faut ajouter le fait que la croissance de la congestion routière accentue les incertitudes sur les temps de parcours, que l'accès aux transports en commun devient un avantage de plus en plus stratégique, que le transport de marchandises est très, trop prisonnier du transport routier, soumis aux mêmes risques que les automobiles (prix, congestion…). Il est donc nécessaire que les politiques publiques envisagent certaines ruptures et prennent le plus tôt possible des mesures, éventuellement expérimentales, pour **réduire l'exposition aux risques de la mobilité des personnes et des marchandises.** Prenons quelques exemples de ruptures auxquelles nous devons nous préparer, en fonction des faits saillants que révèlent les scénarios.

a) Une approche intégrée pour réduire la dépendance des ménages à la hausse des prix et à la rareté des carburants

La cohérence des politiques de transport doit être évaluée en fonction de leurs capacités à rendre les personnes et les marchandises moins dépendantes de la route. La récente hausse des prix du pétrole a montré ce que sont les risques qui nous menacent. Face au coût croissant de l'automobile, de multiples formes d'adaptation ont été observées : report sur les transports collectifs, co-voiturage spontané ou organisé dans l'entreprise, relocalisation de la résidence, aménagement des horaires de travail et/ou développement du télétravail. Le plus souvent, ces ajustements ont eu pour les personnes concernées un coût temporel, les budgets temps de transport (BTT) et les programmes d'activité ont dû s'adapter à l'accroissement des deux composantes du coût généralisé des déplacements automobiles.

Les politiques publiques doivent se préparer, et préparer les citoyens, à des adaptations potentiellement plus délicates, celles qui vont « territorialiser » la notion de mobilité durable. Pour les résidents d'une zone, la durabilité de la mobilité, ce n'est pas seulement l'effet de serre, la pollution ou le bruit, c'est aussi la prise en compte du coût temporel et monétaire des déplacements, y compris dans une perspective de hausse des prix des carburants et/ou de rationnement des rejets de carbone dans l'atmosphère. Dans un monde où le temps est devenu la « ressource la plus rare », une politique de mobilité durable doit s'intéresser non pas essentiellement à la vitesse des déplacements, mais à l'accessibilité et à son évolution, sans se

limiter à la seule accessibilité automobile des personnes. Il est en effet nécessaire de rechercher une compréhension conjointe de la mobilité des personnes et des marchandises d'une part et de la mobilité en automobile et en transports en commun d'autre part.

Pour cela, un service à la mobilité particulier doit être mis en place par les agglomérations : un géo-portail, outil d'aide à la décision pour les politiques publiques de mobilité et d'aménagement du territoire, mais aussi pour les choix privés de localisation, de mode et d'itinéraire. **En mobilisant un modèle de trafic élaboré, mais aussi des bases de données spatiales précises, un SIG interactif et une simulation numérique puissante, il va devenir nécessaire d'offrir au grand public, ménages et entreprises, un outil d'aide à la décision qui sera aussi un puissant levier pour que les politiques publiques s'intéressent aux services réels de mobilité offerts par les autorités organisatrices, des services centrés sur l'usager.**

b) Prendre les mesures nécessaires à une relance vigoureuse du fret ferroviaire

Le Grenelle de l'environnement a souhaité une très forte relance du fret ferroviaire en lui fixant des objectifs précis de reconquête de parts de marché. Le risque serait bien sûr que cela demeure un vœu pieux, comme les 100 milliards de tonnes-kilomètres ferroviaires souhaitées à la fin des années 90 par les Schémas de service collectif. Cet échec doit nourrir la réflexion. Ce n'est pas en claquant des doigts que l'on relance le fret ferroviaire, c'est très précisément en combinant deux types de mesures.

- Le premier concerne directement le ferroviaire. Là, les chemins à emprunter sont connus, même s'ils sont difficiles. Il est nécessaire d'une part de sortir le fret de la SNCF pour en faire une activité totalement indépendante du transport de voyageurs. Il est dans le même temps indispensable d'offrir au fret (de la SNCF et de ses concurrents) des sillons ferroviaires de bonne qualité et potentiellement porteurs d'une offre entièrement repensée, notamment en termes de fiabilité et de vitesse moyenne.
- Le second concerne la route. La problématique du report modal du fret sur longue distance est la même que celle qui a prévalu pour les passagers en zone urbaine. **De même que la part de marché des transports collectifs n'a augmenté dans les villes que là où des contraintes fortes ont pesé sur l'automobile, de même la part de marché du ferroviaire ne progressera que si la double contrainte de la tarification au coût généralisé pèse sur le transport routier de fret à longue distance**. Les difficiles débuts de l'autoroute ferroviaire Bettembourg-Perpignan le montrent. La route reste très compétitive et l'amélioration de l'offre ferroviaire n'est pour l'heure pas suffisante… La mise en place annoncée du péage routier pour les PL doit donc être aussi l'occasion .

Dans ce domaine aussi, ce n'est pas un « big bang » qui donnera des résultats, mais l'expérimentation. Il faut poursuivre l'expérience de ferroutage et en tirer les conséquences pour les mesures d'accompagnement à instaurer sur les axes routiers concurrents. D'autres expérimentations, en projet, doivent être développées.

c) Préparer le transport aérien à la mise en place de contraintes sur les émissions de C02

Le rapport a souligné que le transport aérien sera dans les années à venir un puissant levier de développement de la mobilité. Or ce secteur n'est pas soumis à la taxation du pétrole. Il est

donc nécessaire de remettre à plat la situation. Le puissant lobby des compagnies aériennes (l'IATA), arguant du fait qu'il s'agit d'un secteur très exposé à la concurrence internationale, refuse tout système de taxation du kérosène. Un pays comme la Suède le pratique, mais il s'agit d'un acteur marginal, et le taux de taxation est très faible. Comme il est peu probable que cet exemple se diffuse, il faut prendre au mot l'IATA qui a récemment accepté l'idée des permis d'émission négociables (PEN). Ces derniers existent déjà pour l'industrie au sein de l'Union européenne. Il faut poursuivre dans cette direction **et faire en sorte que les transports aériens entrent eux aussi dans une telle logique**. Cela n'interdira pas, au contraire, d'envisager que d'autres secteurs du transport, comme le fret routier, soient concernés. L'objectif à court terme n'est pas de punir le transport aérien, mais de le faire entrer dans le droit commun, et finalement ouvrir la voie à l'éventualité de la carte carbone.

ANNEXES

6 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 (COURTEDISTANCE)

	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 dsl)	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

7 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	kg/l	PCI
Ethanol carburant / essence	0,79	0,27
ETBE / essence	0,75	0,36
EMHV / gazole	0,88	0,37
Autres biocarburants ex agriculture / gazole		
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		