

PREDIT 4/ Groupe 06

Recherche : Enjeux spatiaux, économiques et politiques des scénarios de mobilité durable à l'horizon 2050

Convention DRI N° 09 MT CV 19

Convention ADEME N°0966C0216

Rapport de la tâche 7 : spatialisation des flux inter-régionaux

B. Château

F. Laroche

Mai 2012

Sommaire

1	Introduction.....	4
2	Spatialisation des flux interrégionaux et internationaux de marchandises et de passagers.....	5
2.1	La spatialisation des flux dans MEDEE-Transport	5
2.1.1	<i>La ventilation des trafics selon les axes de déplacement.....</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Formalisation des trafics par infrastructure.....</i>	<i>8</i>
2.2	Le recalibrage de MEDEE-T sur la base des projections VLEEM-TILT	11
2.2.1	<i>Changement de l'unité monétaire de référence.....</i>	<i>11</i>
2.2.2	<i>Recalibrage des hypothèses de contexte</i>	<i>11</i>
2.2.3	<i>Recalibrage des volumes de trafic.....</i>	<i>13</i>
2.2.4	<i>Recalibrage des parts modales.....</i>	<i>17</i>
2.3	La projection des flux spatialisés avec MEDEE-Transport	18
2.3.1	<i>Trafics de marchandises longue distance.....</i>	<i>18</i>
2.3.2	<i>Trafics de passagers longue distance.....</i>	<i>26</i>
3	Conséquences des projections de trafic sur la congestion et les besoins d'infrastructures nouvelles	31
3.1	La notion de congestion dans le secteur des transports.....	31
3.2	Analyse de la congestion: éléments de méthode	33
3.2.1	<i>La congestion du réseau routier</i>	<i>33</i>
3.2.2	<i>La congestion du réseau ferroviaire</i>	<i>35</i>
3.3	Impacts de la dynamique des trafics sur la congestion.....	39
3.3.1	<i>Trafics routiers et congestion du réseau routier</i>	<i>39</i>
3.3.2	<i>Trafics ferroviaires et congestion du réseau ferré.....</i>	<i>42</i>
3.4	Conclusion : quels besoins en infrastructures ?	56

List of figures

Figure 1 : Les grands axes de déplacement dans MEDEE-transport	6
Figure 2 : Evolution du trafic de marchandises entre 1992 et 2010 (Gtkm).....	18
Figure 3 : Evolution de la répartition modale du transport de marchandises entre 1992 et 2010 (%)	19
Figure 4 : Evolution du trafic de marchandises et de la part modale des principaux modes de transport en France entre 1992 et 2010 selon le modèle MEDEE (Gtkm)	20
Figure 5 : Part des flux de transit dans le trafic total de marchandises en France entre 1992 et 2010 (%)	21
Figure 6 : Trafic total marchandises selon Pégase – Phénix (Gpkm).....	22
Figure 7 : Trafic total marchandises selon Chronos – Pénélope (Gpkm).....	22
Figure 8 : Trafic total marchandises selon Hestia – Cassandre (Gpkm)	23
Figure 9 : Trafic de marchandises et partage modal à l'horizon 2050 selon le scénario Pégase - Phénix.....	24
Figure 10 : Trafic de marchandises total et partage modal à l'horizon 2050 selon le scénario Chronos-Pénélope	25
Figure 11 : Trafic de marchandises total et partage modal à l'horizon 2050 selon le scénario Hestia	26
Figure 12 : Evolution du trafic de passagers entre 1992 et 2000 en indice (base 100 : 1992)	27
Figure 13 : Evolution du trafic de passagers entre 1992 et 2010 (Gpkm)	27
Figure 14 : Evolution du trafic passagers et de la part modale des principaux modes de transport en France entre 1992 et 2010 selon le modèle MEDEE (Gpkm)	28
Figure 15 : Trafic total passagers longue distance selon Pégase – Phénix (Gpkm).....	29
Figure 16 : Trafic total passagers longue distance selon Chronos – Pénélope (Gpkm).....	29
Figure 17 : Trafic total passagers longue distance selon Hestia – Cassandre (Gpkm)	30
Figure 18 : Trafic passagers et part modale des principaux modes de transport en France en 2050 selon le modèle MEDEE-Transport	30
Figure 19 : Courbe débit – irrégularité ferroviaire.....	32
Figure 20 : Courbe débit – temps routier	32
Figure 21 : Grille de lecture de la congestion routière	35
Figure 22 : Définition des itinéraires par axe en 2010.....	38
Figure 23 : Paramètres retenus par types de routes selon le Sétra.....	40
Figure 24 : Evolution du trafic routier à l'horizon 2050 selon Pégase – Phénix (en vkm).....	40
Figure 25 : Estimation de la congestion routière par axe en 2010 selon les scénarios	41
Figure 26 : Projets du SNIT déclarés « à engager avant 2020 »	43
Figure 27 : Table des hypothèses ferroviaires	45
Figure 28 : Typologie des itinéraires par axe.....	45
Figure 29 : Estimation du taux d'utilisation du réseau ferré en 2010 selon le modèle « MEDEE-transport »	49
Figure 30 : Détail du nombre de trains/jour et par axe en 2010.....	50
Figure 31 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite de « référence »	50
Figure 32 : Détail du nombre de trains/jour et par axe en 2050 selon la simulation dite de « référence »	51
Figure 33 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "de matériel roulant".....	52
Figure 34 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'exploitation".....	52
Figure 35 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'exploitation" (S3) conjuguée à la simulation dite de « matériel roulant » (S2).....	53
Figure 36 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'infrastructure" (S4).....	53
Figure 37 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'infrastructure" (S4) conjuguée à la simulation dite de « matériel roulant » (S2).....	54
Figure 38 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'infrastructure et d'exploitation" (S5)	55

Figure 39 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'infrastructure et d'exploitation » (S5) conjuguée à la simulation S6..... 55

1 Introduction

L'objectif visé ici est de spatialiser les flux inter-régionaux et internationaux de transport de personnes et de marchandises de VLEEM-TILT à l'échelle européenne de façon à faire apparaître les besoins d'infrastructures en France et leur taux d'utilisation.

Dans les scénarios de mobilité durable (et dans VLEEM-TILT qui a permis de les quantifier), les flux interrégionaux et internationaux de personnes et de marchandises par modes sont caractérisés par des valeurs moyennes sur des grandeurs caractéristiques comme la vitesse et la distance.

Dans la réalité, ces moyennes cachent de fortes dispersions selon la nature des infrastructures, la géographie des régions traversées, la nature du trafic, etc...Il y a donc un lien fort à un moment donné entre ces moyennes et la distribution des flux selon les types de trajets et les types d'infrastructures : toute modification de cette distribution entraîne de facto des changements dans ces moyennes.

Or les scénarios de mobilité durable, en jouant sur la vitesse et la proximité, entraînent nécessairement – quand ils n'en font pas un objectif- une modification de ces distributions de flux et d'infrastructures. Certes, le lien a été établi avec la modification des moyennes, mais ici aussi plus selon une démarche de bon sens éclairé qu'en mobilisant une approche quantitative objective et modélisée, et sans que soit réellement posée la question de la faisabilité spatiale.

La tâche 7 vise à remédier à cette faiblesse des scénarios.

Elle visait initialement à mettre en œuvre les étapes suivantes :

- définir une typologie des flux et des infrastructures suffisamment homogène au regard des variables caractéristiques évoquées plus haut
- quantifier, pour chaque ensemble flux - infrastructure homogène, les valeurs moyennes pertinentes de ces variables caractéristiques
- simuler, à l'aide de du modèle MEDEE-Transport¹, la localisation des flux et les développements d'infrastructure impliqués par les différents scénarios de mobilité durable ; déterminer les éventuelles contraintes physiques sur le développement des infrastructures du fait de la localisation des flux
- introduire dans TILT un plafonnement des flux par modes susceptible de résulter de contraintes physiques sur le développement des infrastructures
- recalculer les valeurs moyennes des variables caractéristiques sur la base de la distribution des flux x infrastructures selon les ensembles homogènes.

¹ MEDEE-Transport a été développé par Enerdata pour l'ADEME dans le cadre de la préparation des schémas de services collectifs

Au cours de la recherche, les objectifs ont été reformulés, pour en donner une lecture plus "politique". L'intérêt majeur de cette partie de la recherche n'est pas tant en effet d'affiner les valeurs caractéristiques des flux en termes de distance et de vitesse moyennes, que de faire apparaître les besoins d'infrastructures qu'induiront ces flux si l'on ne veut pas remettre en cause ces valeurs caractéristiques (intrinsèquement cohérentes avec les scénarios).

Par ailleurs, il est apparu rapidement qu'un effort particulier devait être entrepris pour mettre en cohérence les projections de trafics de VLEEM-TILT d'un côté, et leur spatialisation avec MEDEE-T de l'autre. De même, la réflexion sur les conditions de congestion des infrastructures en place, préalable à l'identification des besoins d'infrastructures nouvelles, et leur formalisation, demandaient un effort insuffisamment cerné au départ.

Ainsi les étapes de la recherche ont été reformulées de la façon suivante:

- recalibrer le modèle MEDEE-Transport sur la base des projections de VLEEM-TILT
- simuler, à l'aide de du modèle MEDEE-Transport, la localisation des flux impliqués par les différents scénarios de mobilité durable issues de VLEEM-TILT;
- développer une méthodologie de simulation des congestions des infrastructures routières et ferroviaires
- déterminer les éventuelles contraintes physiques sur les infrastructures en place du fait de la localisation de ces flux et les besoins d'infrastructures nouvelles en résultant.

2 Spatialisation des flux interrégionaux et internationaux de marchandises et de passagers

On rappellera d'abord les grandes caractéristiques du modèle MEDEE-Transport, notamment au regard de la spatialisation des flux, pourquoi et comment il a été recalibré sur la base des projections de VLEEM-TILT, et enfin quelles visions il donne quant à la spatialisation des flux dans les différents scénarios.

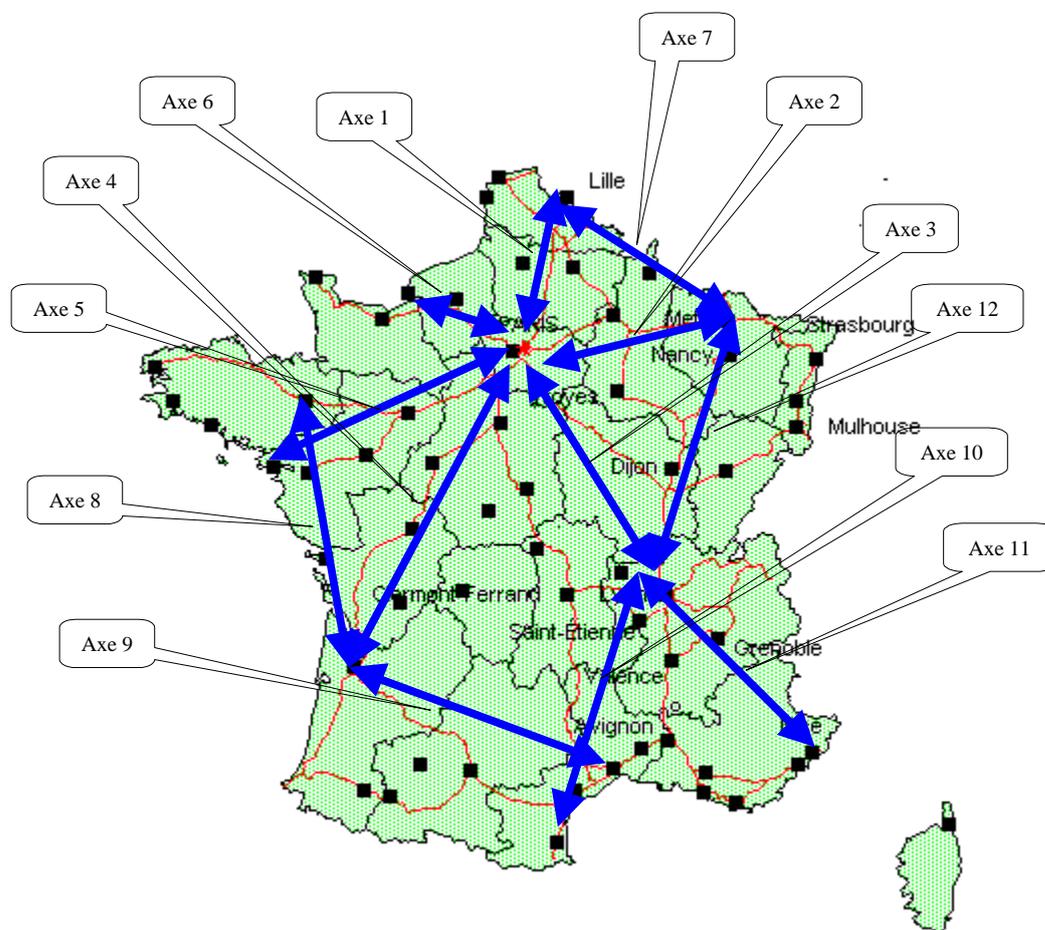
2.1 La spatialisation des flux dans MEDEE-Transport

MEDEE-Transport produit d'abord des projections à long terme des trafics urbains, des trafics intérieurs aux régions, des trafics internationaux et des trafics interrégionaux, par mode, pour les passagers et les marchandises. Le modèle ventile ensuite les trafics internationaux et interrégionaux selon 12 axes de déplacement sur le territoire national, en fonction des origines et des destinations. En dernier lieu, il affecte les flux axiaux aux infrastructures en place sur chacun des axes de déplacement.

2.1.1 La ventilation des trafics selon les axes de déplacement

Quels axes de déplacement?

Figure 1 : Les grands axes de déplacement dans MEDEE-transport



Ventilation des trafics de marchandises

Transit international

Le transit international est pris en compte par le biais des relations d'échanges bilatérales entre pays frontaliers de la France (ou entre les pays frontaliers et les grands ports) selon les régions traversées par ce trafic. Le trafic correspondant (**en tonnes**) est ventilé selon les grands axes retenus, selon une matrice prédéfinie liant les échanges entre deux pays spécifiés aux axes empruntés. Chaque axe emprunté est caractérisé par une distance type, laquelle permet d'associer des tonnes-km en tonnes. La part du trafic réalisé par route est une hypothèse exogène.

Le principal déterminant considéré pour l'évolution des trafics de transit international est le PIB agrégé des pays ayant des échanges bilatéraux donnant naissance à ce trafic de transit.

Import-export

On caractérise les trafics d'import-export (en tonnes) selon la région d'origine ou de destination, et le pays d'origine ou de destination. On s'appuie pour cela sur les matrices d'échanges entre régions et pays frontaliers. Comme pour les trafics de transit, ils sont ensuite ventilés selon les axes de déplacement sur la base des origines et des destinations. La distance moyenne par axe emprunté permet de calculer les tonnes-km par axe. La part du trafic d'import export réalisé par route est une hypothèse exogène.

Les déterminants des trafics d'import-export sont à la fois la démographie et les activités économiques relatives des Régions (dans la France entière) et leur spécialisation industrielle relative.

Trafic interrégional

Comme pour le trafic d'import-export, le modèle distingue les trafics interrégionaux (en tonnes) selon les régions d'origine et de destination. Une matrice O/D lie ces trafics aux axes empruntés, et par conséquent les tonnes aux tonnes-km. La part du trafic d'import export réalisé par route est une hypothèse exogène.

Les déterminants des trafics interrégionaux sont à la fois la démographie et les activités économiques relatives (dans la France entière) des Régions et leur spécialisation industrielle relative.

Ventilation des trafics de passagers

Transit international

Le transit international est pris en compte sur la base des déplacements bilatéraux entre pays frontaliers de la France (ou entre les pays frontaliers et les grands aéroports), principalement pour les vacances et le tourisme, selon les régions traversées. Le trafic correspondant (en passagers) est ventilé selon les axes empruntés. En l'absence d'informations spécifiques sur les axes empruntés par les passagers en transit, ils sont considérés identiques à ceux définis pour le transit de marchandise.

Le principal déterminant considéré pour l'évolution des trafics de transit international est le taux de départ en vacances (lié au PIB) des pays européens et l'activité touristique des pays d'accueil.

Visiteurs étrangers

Le modèle distingue les trafics des visiteurs étrangers selon les pays d'origine d'un côté, les régions de destination de l'autre (non croisé). On dispose pour cela d'une information détaillée sur le tourisme international origine/destination (OCDE) et sur l'accueil et l'hébergement (nuitées) des Régions administratives, tous types de visiteurs confondus.

Le croisement origine x destination, et la ventilation résultante selon les axes, sont effectués sur la base d'une matrice d'échanges entre régions et les pays frontaliers. Cette matrice, en première approximation, et en l'absence d'informations supplémentaires sur les axes empruntés par les visiteurs étrangers, est dérivée de celle définie pour le trafic marchandise d'import-export.

Les déterminants des trafics considérés sont de même nature que ceux pris en compte pour le trafic de transit.

Vacances, autres déplacements longue distance des résidents français

Le modèle distingue les trafics de vacances et les autres trafics longue distance selon les origines d'un côté, les destinations de l'autre. On dispose pour cela d'une information détaillée sur les départ en vacances d'un côté, sur l'accueil et l'hébergement (nuitées) de la Région, tous types de visiteurs confondus, de l'autre, et des résultats des enquêtes « transport » enfin.

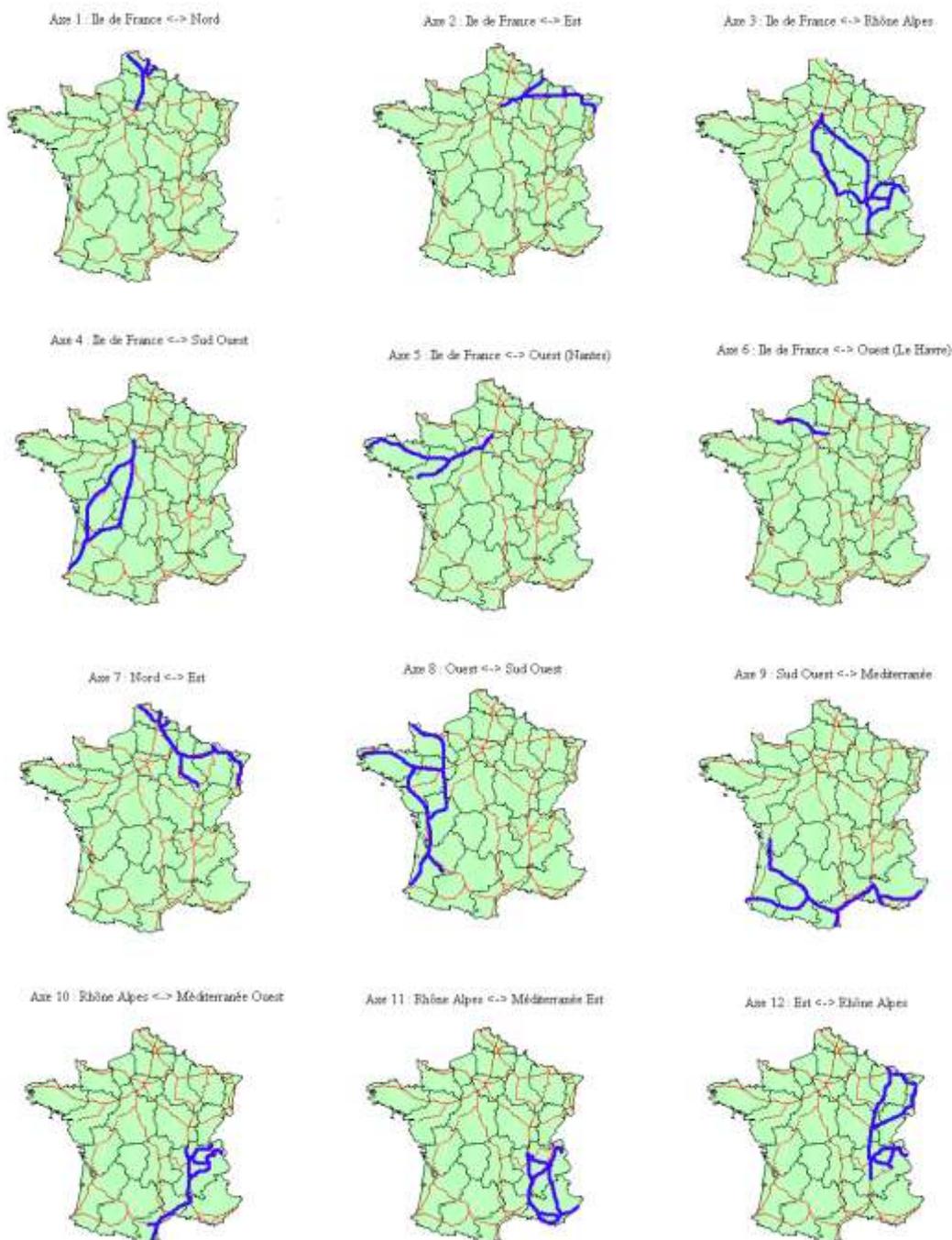
La ventilation des trafics de vacance selon les axes de déplacement se fait selon la même logique que celle retenue pour le trafic interrégional de marchandises. Toutefois la matrice permettant la ventilation est différente de celle retenue pour le trafic de marchandises.

Les déterminants des trafics de vacances sont les taux de départ en vacances (liés au PIB), et pour les autres déplacements de longue distance, le PIB.

2.1.2 Formalisation des trafics par infrastructure

De la notion d'axe de déplacement à la notion d'itinéraire

Afin de spatialiser les flux de trafic selon des trajets "réels", des itinéraires ont été définis. Le trafic sur chaque axe est alors ventilé sur ces itinéraires. Les cartes ci-dessous reprennent pour chaque axe les principaux itinéraires retenus.



Pour affiner l'affectation des trafics axiaux aux infrastructures, il est nécessaire d'explicitier les différents pôles d'attraction au sein de chaque région. Le choix a été fait de retenir les préfectures des départements. La ventilation des trafics entre ces différents pôles est faite au prorata de la population de chacune des préfectures. Ainsi, dans le cas par exemple de la région Nord, le trafic d'import de cette région se ventilerait entre les 8 villes préfectures des départements avec 41% du trafic d'import reçu par la ville de Lille, 9% par celle d'Arras, 6% pour Laon ...

L'itinéraire comme séquence de segments

Un itinéraire, tel qu'il vient d'être défini, peut emprunter plusieurs infrastructures différentes. De plus, certains tronçons sont communs à plusieurs itinéraires. Afin de pouvoir identifier quelles sont les infrastructures empruntées et quel est le volume du trafic sur ces infrastructures il est nécessaire de procéder à un découpage plus fin. Pour cela, un découpage du réseau routier en segment a été réalisé. Un segment est défini comme un trajet univoque (c'est-à-dire sans trajet alternatif et identifié par rapport à une infrastructure donnée). Il est alors possible de définir chaque itinéraire comme une séquence de segments.

La formalisation générique

De manière générique, la modélisation des trafics permettant la ventilation des trafics nationaux par grands axes de déplacements sur des itinéraires "réels" eux-mêmes découpés en segments suit les étapes suivantes :

- ventilation des trafics par axe de déplacement exprimés en tonnes ou nombre de passagers sur des itinéraires réels en fonction de la probabilité que ces trafics empruntent ces itinéraires;
- Découpage de l'ensemble du réseau routier en segments et ventilation du trafic empruntant chaque itinéraire sur les différents segments le composant.
- Le passage des trafics exprimés en tonnes ou passagers à des trafics par segment et par infrastructure, exprimés en tonne-kilomètre ou passager-kilomètre se fait sur la base d'une matrice des distances associées à chaque segment et d'une matrice associant segment et infrastructure

La particularisation selon le type de trafic

La méthodologie retenue pour ventiler le trafic de marchandises et le trafic de passager sur les itinéraires étant identique (même matrice de probabilité qu'un trafic (marchandises ou passager) réalisé sur un axe donné emprunte un itinéraire), seuls sont présentés ici les développements concernant le trafic de marchandises. La transposition aux trafics de passager se fait aisément en considérant que le trafic de transit de passager suit la même logique que le transit de marchandises, le trafic de visiteurs étrangers suit la même logique que le trafic d'import-export de marchandise et le trafic passager interrégional (vacances et autres longues distances) suit une logique identique à celui du trafic interrégional de marchandises.

Transit international

La ventilation du trafic de transit routier de marchandises sur les itinéraires et les segments les composant se fait d'une manière légèrement différente à celle présentée plus haut. En effet, ce trafic par définition ne provient ou n'est pas émis par une région particulière. Aussi, les matrices d'itinéraires reliant les villes entre elles ou les villes aux différents pays frontaliers ne peuvent pas être utilisés. C'est pourquoi des itinéraires propres au transit routier (construits à partir des informations données par le CETE sur les itinéraires de transit) ont été définis permettant de ventiler directement le trafic exprimé en tonnes/axe sur les segments.

Import-export, interrégional

Les trafics d'import - export et interrégional sont ventilés par itinéraires et segments à l'aide de deux matrices de distribution:

- une matrice de probabilités qu'un trafic d'import / export empruntant tel axe passe par tel itinéraire.
- une matrice des probabilités qu'un trafic empruntant tel itinéraire emprunte tel segment.

Le poids relatif des pôles dans la région est mis à contribution pour allouer les flux par itinéraires partant/arrivant du pôle.

2.2 Le recalibrage de MEDEE-T sur la base des projections VLEEM-TILT

2.2.1 Changement de l'unité monétaire de référence

Le modèle MEDEE-T avait été initialement calibré sur la base des Francs 1990.

Le recalibrage sur la base des euros 2005 a été entrepris à partir d'un convertisseur-déflateur calculé à partir des PIB de l'année 2005 mesuré selon les deux systèmes d'unité.

2.2.2 Recalibrage des hypothèses de contexte

Les hypothèses sur le PIB, la population totale et les ménages par taille sont directement reprises des résultats de VLEEM.

Les hypothèses sur la décomposition sectorielle du PIB résultent d'un travail additionnel, basé sur les différents exercices de prévision énergétique nationaux.

Pégase-Phénix

Population					
millions					
T					
	1992	2000	2010	2025	2050
	57,2	58,9	63,2	64,8	71,9
Ménages					
millions					
T					
K	1992	2000	2010	2025	2050
1 pers	5,8	6,6	8,1	9,5	11,7
autres	12,6	13,6	14,5	14,2	14,8
2pers, non actif	3,3	3,7	4,2	5,0	6,8
Total	21,7	23,9	26,8	28,7	33,3
PIB(T)					
G€2005					
T					
	1992	2000	2010	2025	2050
	1409	1588	1768	1929	4590
	88,7	100	111,3	121,4	289,0
					indice
Valeurs ajoutées					
G€2005					
T					
B	1992	2000	2010	2025	2050
Agriculture	28	30	32	33	43
Energie	28	33	35	36	79
Industrie manuf	159	182	172	170	391
BTP	88	82	83	84	120
Tertiaire	927	1061	1223	1362	3377

Chronos-Pénélope

Population					
millions					
T					
	1992	2000	2010	2025	2050
	57,2	58,9	63,2	63,71	65,08
Ménages					
millions					
T					
K	1992	2000	2010	2025	2050
1 pers	5,8	6,6	8,1	9,3	10,6
autres	12,6	13,6	14,5	14,0	13,4
2pers, non actif	3,3	3,7	4,2	4,9	6,2
Total	21,7	23,9	26,8	28,2	30,1
PIB(T)					
G€2005					
T					
	1992	2000	2010	2025	2050
	1409	1588	1768	2090	2924
	88,7	100	111,3	131,6	184,1
					indice
Valeurs ajoutées					
G€2005					
T					
B	1992	2000	2010	2025	2050
Agriculture	28	30	32	33	43
Energie	28	33	35	36	79
Industrie manuf	159	182	172	184	244
BTP	88	82	83	91	75
Tertiaire	927	1061	1223	1480	2113

Hestia-Cassandra

Population					
millions					
T					
	1992	2000	2010	2025	2050
	57,2	58,9	63,2	64,3	66,71
Ménages					
millions					
T					
K	1992	2000	2010	2025	2050
1 pers	5,8	6,6	8,1	9,4	10,8
autres	12,6	13,6	14,5	14,1	13,8
2pers, non actif	3,3	3,7	4,2	5,0	6,3
Total	21,7	23,9	26,8	28,5	30,9
PIB(T)					
G€2005					
T					
	1992	2000	2010	2025	2050
	1409	1588	1768	1671	2265
	88,7	100	111,3	105,2	142,6
					indice
Valeurs ajoutées					
G€2005					
T					
B	1992	2000	2010	2025	2050
Agriculture	28	30	32	29	21
Energie	28	33	35	31	39
Industrie manuf	159	182	172	147	193
BTP	88	82	83	73	59
Tertiaire	927	1061	1223	1180	1666

2.2.3 Recalibrage des volumes de trafic

Du fait de logiques de modélisation différentes dans VLEEM et dans MEDEE-T, les projections de trafics résultant des hypothèses économiques et démographiques ci-dessus sont forcément différentes.

Si ces différences sont mineures (en termes relatifs notamment), ce qui c'est avéré le cas en règle générale, et compte-tenu de l'incertitude sur les paramètres des modèles utilisés sur un horizon aussi lointain (2050 en l'occurrence), il est admissible de recalibrer les paramètres d'un des deux modèles de façon à aligner plus précisément ses résultats sur ceux de l'autre modèle. C'est ce qui a été fait pour les paramètres de MEDEE-T, sur la base des projections de VLEEM considérées comme référentes.

Ce recalibrage n'a porté en fait que les trafics de longue distance, objets de cette tâche 7, et déterminants sur la question des grandes infrastructures de transport.

Trafic marchandises longue distance

Dans MEDEE-T, les paramètres-clés et variables-clés pour le calcul du volume de trafics marchandises longue distance sont les suivants:

Trafic inter-régional:

- valeur ajoutée par grands secteurs et par branches industrielles
- productions des industries de base (acier, ciment, bases pétrochimiques, engrais azotés, chlore, papiers-pâtes à papier)

- ratios production / valeur ajoutée par grand secteur et par branche industrielle,
- élasticités du trafic intérieur au volume de production, par grande famille de produits (agro-alimentaires, matériaux de construction, énergie, autres produits manufacturés)

Trafic import-export:

- volumes d'importation / exportation par grand secteur et par branche industrielle
- élasticités du trafic d'export au volume des exportations, par grande famille de produits
- élasticités du trafic d'import au volume des importations, par grande famille de produits

Trafic de transit:

- PIB des pays européens et du reste du monde
- élasticité des trafics de transit entre pays limitrophes (et/ou ports maritime à vocation internationale) au PIB global des zones d'attraction de ces pays limitrophes (et/ou ports)

Pour ce qui est des variables économiques clés (VA, PIB, ...), le calibrage a consisté principalement à décliner pour chaque scénario, les conséquences des hypothèses macro-économiques des scénarios sur les variables en question.

Pour ce qui est des paramètres (élasticités et ratios), le calibrage a consisté à ajuster d'abord les valeurs de ces paramètres pour le scénario PEGASE-PHENIX, le plus proche du scénario par défaut considéré au préalable dans MEDEE-T, puis à reprendre ces valeurs pour les deux autres scénarios.

On présente ci-dessous les valeurs des paramètres communes aux trois scénarios.

Div manif	Agro-alim	Mat const	Energie
0,795	1	0,5	0

	1975-1992	1992-2010	2010-2050
Div manif	0,68	0,83	0,83
Agro-alim	0,63	0,83	0,83
Mat const	0,13	0,13	0,13
Energie	0,48	0	0

	1975-1992	1992-2010	2010-2050
Div manif	0,54	0,83	0,83
Agro-alim	0,78	0,83	0,83
Mat const	0,58	0,58	0,58
Energie	0	0	0

Elasticité du trafic de transit entre zones au PIB global des zones d attraction

De	A	1975-1992	1992-2000	2000-2010	2010-2025	2025-2050
Royaume-Uni	Belgique	2	1	0,8	0,6	0,3
	Luxembourg	2	1	0,8	0,6	0,3
	Allemagne	2	1	0,8	0,6	0,3
	Suisse	2	1	0,8	0,6	0,3
	Piémont	2	2	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Pays Basque	2	3	2,4	1,2	0,3
Belgique	Royaume-Uni	2	1	0,8	0,6	0,3
	Luxembourg	2	1	0,8	0,6	0,3
	Allemagne	2	1	0,8	0,6	0,3
	Suisse	2	1	0,8	0,6	0,3
	Piémont	2	2	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Pays Basque	2	3	2,4	1,2	0,3
Luxembourg	Royaume-Uni	2	1	0,8	0,6	0,3
	Belgique	2	1	0,8	0,6	0,3
	Allemagne	2	1	0,8	0,6	0,3
	Suisse	2	1	0,8	0,6	0,3
	Piémont	2	2	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Pays Basque	2	3	2,4	1,2	0,3
	Fos-Marseille	2	3	2,4	1,2	0,3
	Nantes-St Nazaire	2	3	2,4	1,2	0,3
	Le Havre	2	3	2,4	1,2	0,3
	Calais-Dunkerque	2	3	2,4	1,2	0,3
Allemagne	Royaume-Uni	2	1	0,8	0,6	0,3
	Belgique	2	1	0,8	0,6	0,3
	Luxembourg	2	1	0,8	0,6	0,3
	Suisse	2	1	0,8	0,6	0,3
	Piémont	2	2	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Pays Basque	2	3	2,4	1,2	0,3
	Fos-Marseille	2	3	2,4	1,2	0,3
	Nantes-St Nazaire	2	3	2,4	1,2	0,3
	Le Havre	2	3	2,4	1,2	0,3
	Calais-Dunkerque	2	3	2,4	1,2	0,3
Suisse	Royaume-Uni	2	1	0,8	0,6	0,3
	Belgique	2	1	0,8	0,6	0,3
	Luxembourg	2	1	0,8	0,6	0,3
	Allemagne	2	1	0,8	0,6	0,3
	Piémont	2	2	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Pays Basque	2	3	2,4	1,2	0,3
	Fos-Marseille	2	3	2,4	1,2	0,3
	Nantes-St Nazaire	2	3	2,4	1,2	0,3
	Le Havre	2	3	2,4	1,2	0,3
	Calais-Dunkerque	2	3	2,4	1,2	0,3
Piémont	Royaume-Uni	2	2	1,6	0,6	0,3
	Belgique	2	2	1,6	0,6	0,3
	Luxembourg	2	2	1,6	0,6	0,3
	Allemagne	2	2	1,6	0,6	0,3
	Suisse	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	1,6	0,6	0,3
	Pays Basque	2	3	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	2	1,6	0,6	0,3
Gênes	Royaume-Uni	2	2	1,6	0,6	0,3

	Belgique	2	2	1,6	0,6	0,3
	Luxembourg	2	2	1,6	0,6	0,3
	Allemagne	2	2	1,6	0,6	0,3
	Suisse	2	2	1,6	0,6	0,3
	Catalogne	2	3	1,6	0,6	0,3
	Pays Basque	2	3	1,6	0,6	0,3
Catalogne	Royaume-Uni	2	3	2,4	1,2	0,3
	Belgique	2	3	2,4	1,2	0,3
	Luxembourg	2	3	2,4	1,2	0,3
	Allemagne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Suisse	2	3	2,4	1,2	0,3
	Piémont	2	3	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	3	1,6	0,6	0,3
Pays Basque	Royaume-Uni	2	3	2,4	1,2	0,3
	Belgique	2	3	2,4	1,2	0,3
	Luxembourg	2	3	2,4	1,2	0,3
	Allemagne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Suisse	2	3	2,4	1,2	0,3
	Piémont	2	3	1,6	0,6	0,3
	Gênes	2	3	1,6	0,6	0,3
Fos-Marseille	Luxembourg	2	3	2,4	1,2	0,3
	Allemagne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Suisse	2	3	2,4	1,2	0,3
Nantes-St Naz	Luxembourg	2	3	2,4	1,2	0,3
	Allemagne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Suisse	2	3	2,4	1,2	0,3
Le Havre	Luxembourg	2	3	2,4	1,2	0,3
	Allemagne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Suisse	2	3	2,4	1,2	0,3
Calais-Dunkerque	Luxembourg	2	3	2,4	1,2	0,3
	Allemagne	2	3	2,4	1,2	0,3
	Suisse	2	3	2,4	1,2	0,3

Taux de croissance du ratio production / valeur ajoutée

Branches	1975-1992	1992-2010	2010-2050
Sidérurgie	-0,01	0,031	0,031
Non ferreux	-0,04	0,031	0,031
Chimie, caout	0,00	-0,011	-0,011
Mat const, verre	0,01	0,006	0,006
IAA	0,02	0,003	0,003
Textiles	0,01	-0,018	-0,018
Papier & pates, ed	0,03	-0,002	-0,002
Equipement	0,01	-0,002	-0,002
Autres	0,00	0,007	0,007

Secteurs	1975-1992	1992-2010	2010-2050
Agriculture	0,01	-0,009	-0,009
Energie	-0,02	0,029	0,029
Industrie manuf	0,01	-0,002	-0,002
BTP	0,01	0,012	0,012
Tertiaire	0,02	0,005	0,005

Tcam du volume de production des IGCE (en %/an)

	2010-2025	2025-2050
Acier	3,2	0,2
Chlore	0,0	0,0
Ammoniac	0,0	0,0
Ethylene	0,0	0,0
Ciment	-0,2	0,0
Papier et pâtes	2,0	2,0

Trafic passagers longue distance

Dans MEDEE-T, le trafic longue distance de passagers est constitué du trafic lié aux vacances et au trafic professionnel ou privé pour d'autres motifs. On distingue le trafic longue distance des résidents français, le trafic des visiteurs étrangers en France et le trafic de transit.

Pour les trafics de vacances, les drivers pris en compte sont la population et le taux de départ en vacances, lui-même lié au PIB/habitant. Pour les autres motifs, les déterminants sont la population et le PIB.

Par souci de simplification, les PIB considérés sont les mêmes que ceux utilisés pour le calcul des trafics de transit ci-dessus, et dépendent bien sûr des scénarios.

Compte-tenu de la grande proximité des résultats entre les deux modèles pour les trafics passagers longue distance, aucune modification n'a été apportée aux élasticités.

Taux de croissance des PIB des zones limitrophes (%/an)

	PEGASE-PHENIX		CHRONOS-PENELOPE		HESTIA-CASSANDRE	
	2010-2025	2025-2050	2010-2025	2025-2050	2010-2025	2025-2050
Royaume-Uni	2,3%	3,6%	2,3%	1,7%	1,2%	1,7%
Belgique	1,8%	2,8%	1,8%	1,3%	0,9%	1,3%
Luxembourg	3,0%	4,1%	3,0%	1,9%	1,5%	1,9%
Allemagne	1,6%	1,7%	1,6%	0,8%	0,8%	0,8%
Suisse	1,8%	2,6%	1,8%	1,2%	0,9%	1,2%
Italie	1,3%	1,9%	1,3%	0,9%	0,7%	0,9%
Espagne	1,7%	3,4%	1,7%	1,6%	0,9%	1,6%
Reste du monde	4,5%	5,0%	4,5%	3,0%	2,3%	3,0%

2.2.4 Recalibrage des parts modales

Trafic marchandises longue distance

Dans la version de MEDEE-T utilisée, les parts modales résultent fondamentalement des hypothèses retenues sur la progression du trafic ferroviaire et fluvial. Ces parts ont été recalibrées à partir des résultats de VLEEM.

Taux de croissance des modes non routiers (%/an)

	PEGASE-PHENIX		CHRONOS-PENELOPE		HESTIA-CASSANDRE	
	2010-2025	2025-2050	2010-2025	2025-2050	2010-2025	2025-2050
Fer	8,0%	-2,0%	12,0%	2,5%	9,0%	2,3%
Voie d'eau	1,4%	0,0%	1,0%	1,0%	2,0%	1,0%

Trafic passagers longue distance

Pour les passagers longue distance, les parts modales sont stipulées de façon exogène pour chaque catégorie de trafic dans MEDEE-T. Ces parts ont été recalibrées, pour chaque scénario, en fonction des résultats globaux longue distance de VLEEM.

Parts modales des départs en vacances des résidents français (%)

	2010	PEGASE-PHENIX		CHRONOS-PENELOPE		HESTIA-CASSANDRE	
		2025	2050	2025	2050	2025	2050
Voiture	68%	59%	23%	47%	33%	65%	45%
Autocar	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
Fer	16%	21%	47%	41%	57%	23%	45%
Avion	12%	15%	25%	7%	5%	7%	5%

Parts modales des déplacements longue distance, autres motifs (%)

	2010	PEGASE-PHENIX		CHRONOS-PENELOPE		HESTIA-CASSANDRE	
		2025	2050	2025	2050	2025	2050
Voiture	72%	64%	28%	52%	38%	70%	50%
Fer	18%	21%	47%	41%	57%	23%	45%
Avion	9%	15%	25%	7%	5%	7%	5%

2.3 La projection des flux spatialisés avec MEDEE-Transport

La projection des données par axe permet une lecture simplifiée des principaux résultats tout en donnant une dimension plus spatiale au modèle. Nous analyserons les trafics de marchandises puis de voyageurs selon une même méthode : aperçu rétrospectif 1992 – 2010, tendance générale des trois scénarios à 2050 et décomposition des résultats par axe.

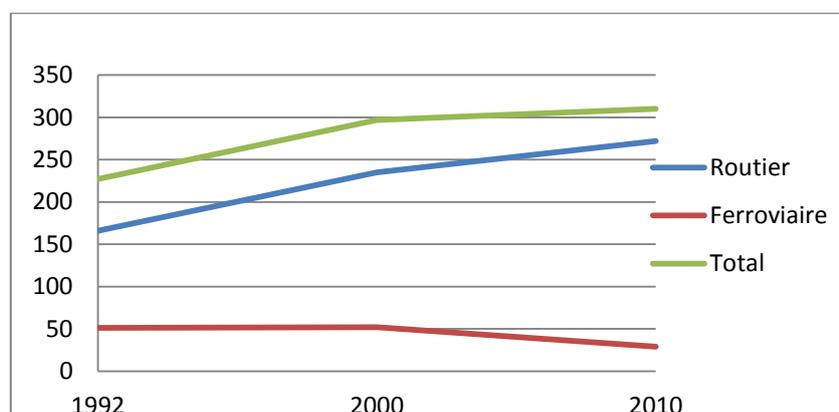
2.3.1 Trafics de marchandises longue distance

Aperçu rétrospectif et état des lieux en 2010

Etat des lieux général

Les résultats du modèle confirment pour la période 1992 – 2010 la dynamique observée du transport de marchandises en France. On distingue deux phases.

Figure 2 : Evolution du trafic de marchandises entre 1992 et 2010 (Gt.km)



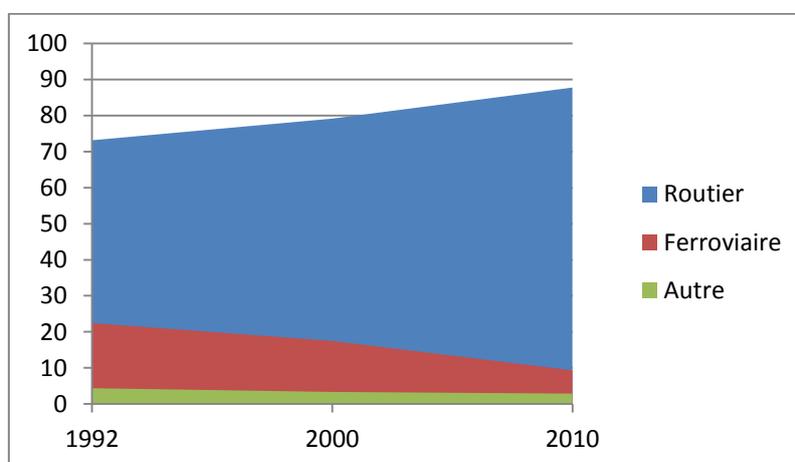
La première période entre 1992 et 2000 révèle une forte progression des Tkm en France (+31%) dont le transport routier semble avoir été le principal bénéficiaire (+ 42%) tandis que le transport ferroviaire s'est stabilisé (+2%). Cette divergence entre ces deux modes montre que l'accroissement de la demande en transport de marchandise s'est d'avantage portée sur le mode routier, le ferroviaire se cantonnant au maintien de ses trafics traditionnels.

La seconde période, 2000 – 2010, confirme cet écart entre les modes et concrétise l'effondrement du fret ferroviaire (-44%). A noter que si le modèle a été calé avec des statistiques de 2000, les trois scénarios s'accordent dans leurs projections 2010 routières et ferroviaires. Ces projections convergent avec les données réelles observées en 2010, notamment dans le cas du fret ferroviaire : 30,1 Gtkm² contre 29,6 Gtkm selon le modèle.

A contrario, le transport routier a poursuivi sa progression en termes de volume et de part de marché et ce malgré la crise économique débutée en 2007. L'écart entre les prédictions du modèle pour 2010 et les trafics observés est réduit (respectivement 272Gtkm contre 305Gtkm³).

Cette divergence entre les deux modes n'a fait que renforcer la part modale du transport routier contrairement aux objectifs initiaux fixés par le Grenelle de l'environnement (2007) qui étaient d'obtenir une croissance de la part modale des modes non routier et non aérien de 25% entre 2006 et 2012⁴.

Figure 3 : Evolution de la répartition modale du transport de marchandises entre 1992 et 2010 (%)



Trois facteurs peuvent expliquer cet écart. En premier lieu, la structure du PIB français s'est profondément modifiée en faveur des activités de service au détriment de l'industrie manufacturière. En second lieu, l'industrie a elle-même muté vers une production de produits à plus forte valeur ajoutée et plus légers supplantant l'industrie lourde traditionnellement favorable au ferroviaire. Enfin, d'un point de vue endogène, la structure

² Compte des transports 2010

³ Compte des transports, 2010

⁴ Article 11, Loi n°2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (DEVX0811607L), Version consolidée au 01 juillet 2010

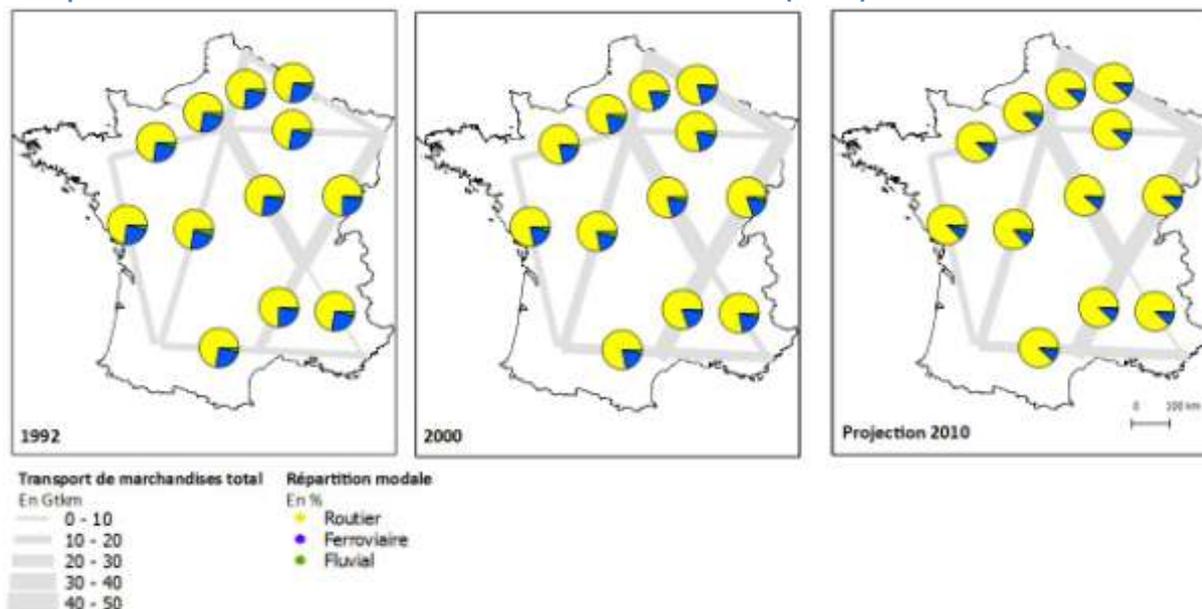
productive et les services proposés par le mode ferroviaire n'auraient pas su s'adapter aussi rapidement que le routier aux évolutions de l'économie mondiale provoquant une chute supplémentaire des trafics pour des raisons de productivité et de compétitivité.

La situation de référence de l'étude est donc la suivante. On a en 2010 une quasi-hégémonie du transport routier sur les autres modes avec une progression constante en tonnes – kilomètre pour le mode routier, un maintien pour le fluvial et une baisse importante pour le ferroviaire.

Décomposition par axe

Les trois cartes suivantes offrent un aperçu de l'évolution globale du trafic de marchandises en Gtkm depuis 1992. L'ensemble des données est ventilé selon les 12 axes.

Figure 4 : Evolution du trafic de marchandises et de la part modale des principaux modes de transport en France entre 1992 et 2010 selon le modèle MEDEE (Gtkm)



La lecture de ces cartes révèle la permanence d'un profond déséquilibre entre l'Est et l'Ouest. Cette tendance s'est renforcée entre 1992 et 2010. L'axe 12 (Est – Sud Est via l'A31) est le plus chargé des axes sur la période. Cependant, il n'est pas celui qui a bénéficié de la meilleure dynamique, les axes 10 (Sud Est – Arc méditerranéen) et 7 (Nord – Est) ayant rattrapé leur retard entre 1992 et 2000. La projection cartographique confirme d'une part l'importance des flux internationaux en France (37% en 2010), notamment sur l'axe Rhin – Rhône – Méditerranée et d'autre part la faiblesse de nos grands ports maritimes dans les échanges nationaux symbolisée en particulier par l'atrophie permanente de l'axe 6 (axe Seine).

Figure 5 : Part des flux de transit dans le trafic total de marchandises en France entre 1992 et 2010 (%)

	1992	2000	2010
Axe 1	29	37	39
Axe 2	17	23	25
Axe 3	35	45	48
Axe 4	8	11	10
Axe 5	15	23	25
Axe 6	0	0	0
Axe 7	65	72	73
Axe 8	4	7	8
Axe 9	26	37	41
Axe 10	22	28	28
Axe 11	24	34	35
Axe 12	38	44	42
Total	27	35	37

Concernant le partage modal, la répartition est homogène sur l'ensemble des axes et ce sur l'ensemble de la période. Le constat reste donc identique à celui précédemment dressé. Le ferroviaire accuse un repli fort sur l'ensemble des axes tandis que le fluvial maintient discrètement ses parts de marché.

Tendance selon les trois scénarios à 2050

Présentation des scénarios VLEEM-TILT et tendances générales

Les trois scénarios issus du modèle VLEEM - TILT présentent chacun des caractéristiques spécifiques présentées dans les rapports précédents⁵ et la thèse de H. Lopez-Ruiz (2009). Cette partie ne constitue donc qu'un rappel de la logique et des projections de ces scénarios.

Le scénario Pégase-Phénix est tendanciel. On considère que la croissance du PIB, après une quasi-disparition entre 2010 et 2025 (0%/an) renaît de ses cendres suite à un effet de rattrapage important sur la période 2025 – 2050 (3%/an). En conséquence, on obtient un doublement du PIB. Le Budget Temps de Transport (BTT) est considéré stable sur la période mais le processus de déconcentration spatiale des activités sur le territoire (extension des aires de vie) s'accroît ce qui, combiné à l'accroissement du PIB, renforce le besoin en vitesse (élasticité vitesse moyenne/PIB de 0,6 pour les marchandises). A l'horizon 2050 ce scénario traduit donc une augmentation des tkm (+78% par rapport à 2010) et un besoin en vitesse plus important.

⁵ ENERDATA (2010), *Crise économique et scénarios de mobilité durable*, 1^{er} rapport intermédiaire, Predit 4, groupe 6

Figure 6 : Trafic total marchandises selon Pégase – Phénix (Gpkm)

	2010	2050	Evolution 2010 - 2050	Part modale 2050
Route	311	537	73%	87%
Rail	30	73	143%	12%
Voie d'eau	7	9	29%	1%
Total	348	619	78%	100%
Observé	343			

Le tableau suivant illustre ce propos. Le partage modal reste inchangé entre les différents modes, le transport routier bénéficiant de l'essentiel des nouveaux trafics. Cependant, le développement de services ferroviaires fret rapides à l'horizon 2025 – 2050 pourrait permettre à ce mode d'offrir une alternative viable au mode routier en termes de vitesse pour certains marchés de niche.

Par ailleurs, on retient pour ce scénario la validation empirique de ses projections pour la période 1992 – 2010. La marge d'erreur n'excède pas 2% et permet de justifier l'utilisation de ces données pour la période de référence dans la suite de l'étude.

Le scénario Chronos - Pénélope incarne la valeur temps et la « multimodalité verte » (LOPEZ-RUIZ, 2009). Il décrit un avenir similaire à Pégase mais moins favorable à la vitesse, restreinte par les politiques publiques de limitation des émissions CO2. Le taux de croissance moyen est de 1%/an mais l'élasticité vitesse moyenne/PIB est ramenée à 0 alors que le processus de déconcentration spatiale n'est pas remis en cause. Par conséquent, le BTT se voit augmenté de 20%, le temps de transport augmentant pour compenser le besoin en vitesse.

Figure 7 : Trafic total marchandises selon Chronos – Pénélope (Gpkm)

	2010	2050	Evolution 2010 - 2050	Part modale 2050
Route	310	208	-33%	34%
Rail	30	261	770%	42%
Voie d'eau	8	11	38%	2%
Total	348	480	38%	78%

Le scénario prédit une augmentation du trafic total de marchandises (+38%) mais dans une moindre mesure que Pégase – Phénix et selon une logique très différente. Le mode ferroviaire rattrape son retard sur le routier pour représenter plus de 50% du transport de marchandise. Ce rattrapage s'explique par l'introduction de politiques publiques fortes en défaveur du mode routier (limitation des vitesses, augmentation de la tarification de l'infrastructure) au profit du ferroviaire qui bénéficie d'investissements importants en infrastructure et d'une réorganisation profonde de ses services (amélioration des vitesses d'exploitation, etc.).

Le scénario Hestia - Cassandre simule un découplage absolu entre PIB et transport dans un contexte économique difficile. Il envisage une croissance négative sur la période 2010 – 2025 de -0,5%/an, suivie d'un modeste rebond de +1,5%/an entre 2025 et 2050. L'accroissement du niveau de vie sur la période n'est plus que de 35% d'ici 2050. Le découplage est réalisé à partir de politiques publiques contraignantes en termes de limitation des vitesses et de tarification des infrastructures pour le mode routier. L'élasticité vitesse moyenne/PIB est réduite à 0 et le BTT est considéré constant. Cette configuration entraîne une relocalisation des activités en faveur de la proximité. Par conséquent, les aires de déplacement ont tendance à se rétracter réduisant d'autant la croissance de tkm (+ 17%) par rapport aux deux premiers scénarios. Hestia - Cassandre propose donc en plus d'un changement d'ordre économique, une évolution des modes de vie.

Figure 8 : Trafic total marchandises selon Hestia – Cassandre (Gpkm)

	2010	2050	Evolution 2010 - 2050	Part modale 2050
Route	310	252	-19%	41%
Rail	30	143	377%	23%
Voie d'eau	8	11	38%	2%
Total	348	406	17%	66%

Le scénario est favorable à un partage plus équilibré des modes. Les contraintes pesant sur le transport routier favorisent la compétitivité du ferroviaire à condition de réorganiser les services et de réaliser les investissements nécessaires en infrastructure pour assimiler l'augmentation des trafics.

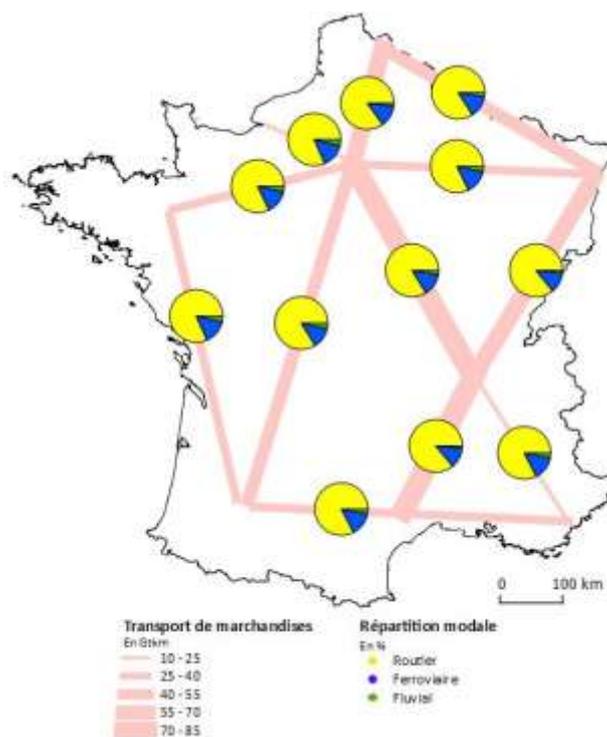
Décomposition par axe et scénario

La ventilation spatiale des données à l'horizon 2050 doit être perçue comme un indicateur du potentiel de développement des principaux axes de transport et des modes de transport. Les scénarios permettent d'affiner la lecture de ce potentiel selon des conditions macroéconomiques différentes.

Le scénario Pégase - Phénix améliore sensiblement la répartition des flux sur le territoire sans modifier la hiérarchie des axes et le déséquilibre Est/Ouest. Il confirme la sous-performance de l'axe Seine alors que la vallée du Rhône continue de drainer l'essentiel des flux et que l'axe Paris – Lyon est conforté.

On observe peu de changements concernant le partage modal par axe. Le mode routier reste dominant, le fluvial et le fret ferroviaire étant cantonnés aux segments les plus pertinents dans leur domaine d'exploitation. L'augmentation de leurs trafics est tendancielle et sans report modal. Néanmoins, l'accroissement du besoin en vitesse pourrait entraîner un report marginal du routier vers le rail par le développement de services à très grande vitesse dans le secteur de la messagerie express (projet Euro Carex). Ces nouveaux flux représenteraient peu en volume mais suffisamment en valeur ajoutée pour justifier leur rentabilité économique.

Figure 9 : Trafic de marchandises et partage modal à l'horizon 2050 selon le scénario Pégase - Phénix

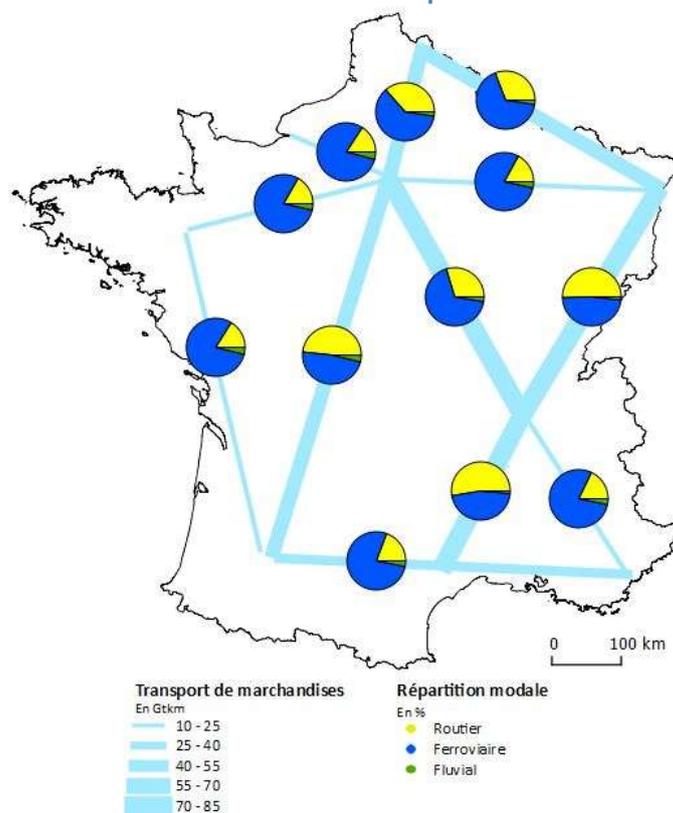


La cartographie du scénario Chronos – Pénélope révèle une répartition plus homogène des flux sur le territoire. Il semblerait que la limitation des vitesses et l'augmentation du BTT en temps passé dans les transports en soient les principaux facteurs explicatifs. Seul le corridor de la basse vallée du Rhône reste surreprésenté au niveau national.

La répartition modale est en rupture totale avec le scénario Pégase - Phénix. On observe pour l'ensemble des axes, avec plus ou moins d'intensité, un basculement des trafics vers le ferroviaire. Si le mode fluvial continue de peser faiblement dans le partage modal, le ferroviaire voit sa situation s'améliorer très nettement avec une part modale moyenne par axe supérieure à 50%.

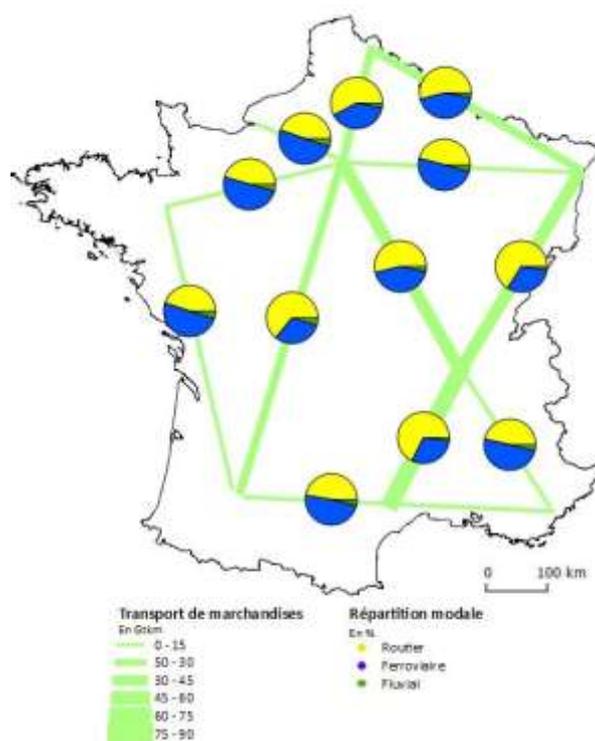
On note que le déséquilibre observé dans la répartition modale entre les axes majeurs et secondaires s'explique en partie par un biais du modèle MEDEE. Les basculements modaux n'apparaissent pas dans les trafics de transit. Néanmoins, ce biais présente deux avantages. D'une part, il permet d'identifier les axes où le trafic de transit représente une part importante des flux. D'autre part, il rappelle qu'un report massif vers le ferroviaire des échanges nationaux pourrait avoir pour effet rétroactif de libérer de la capacité routière favorable au transit longue distance. La problématique devient alors celle de la capacité du réseau ferré à absorber ce surplus de trafics.

Figure 10 : Trafic de marchandises total et partage modal à l'horizon 2050 selon le scénario Chronos-Pénélope



Hestia s'inscrit en rupture des précédents scénarios. Le volume global des trafics est largement inférieur et le partage modal s'équilibre entre routier et ferroviaire. Pour autant, les mêmes remarques s'appliquent à ce scénario, à savoir une concentration des flux sur quelques axes au profit de l'Est, et un biais du modèle dans la répartition modale pour les axes de transit. Seule différence avec les projections précédentes, le mode fluvial apparaît plus clairement dans le partage modal, notamment sur l'axe Seine (4%). La limitation des vitesses et des flux provoquée par la recherche du découplage PIB/Transport a donc pour conséquence d'engager un processus de convergence entre les modes ferroviaire et routier. Cependant, la question de l'infrastructure et de la capacité du système ferroviaire actuel à recevoir et conserver ces nouveaux trafics potentiels reste posée. Nous tenterons d'y répondre dans la suite du rapport.

Figure 11 : Trafic de marchandises total et partage modal à l'horizon 2050 selon le scénario Hestia



Pour conclure, cette projection des résultats du modèle VLEEM-TILT selon le modèle MEDEE révèle en partie le potentiel des axes en transport de marchandises. Les axes transversaux de l'Est de la France restent dominants à l'horizon 2050 bien que la possibilité d'un rééquilibrage partiel des flux sur le territoire soit envisageable. Concernant la répartition modale, le scénario au fil de l'eau n'anticipe pas de renversement majeur. Le transport routier reste le mode le plus compétitif pour répondre à l'éclatement des systèmes productifs et à l'accroissement des distances parcourues. Le ferroviaire se replie sur ses segments les plus rentables (trains complets) et développe à la marge des services de fret à grande vitesse. Le renversement intervient dans Chronos et Hestia. Deux scénarios où l'action des politiques publiques à l'encontre du mode routier est forte et où le développement du transport ferroviaire est vigoureusement promu. Cela pose des questions non résolues pour le système ferroviaire de capacité en assimilation de ces potentiels nouveaux trafics.

2.3.2 Trafics de passagers longue distance

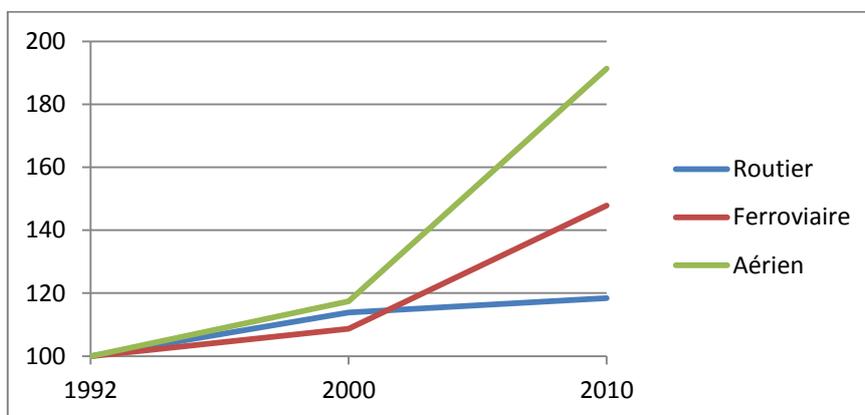
Aperçu rétrospectif et état des lieux en 2010

Etat des lieux en 2010

La situation pour le transport de passagers entre 1992 et 2010 est inverse au transport de marchandises. Les modes rapides ont connu une croissance marquée. L'aérien et le ferroviaire croissent respectivement de 91% et 47% tandis que le routier progresse de 16%.

Cette observation valide en partie la relation forte établie pour le transport de passagers entre accroissement du PIB et besoin en vitesse.

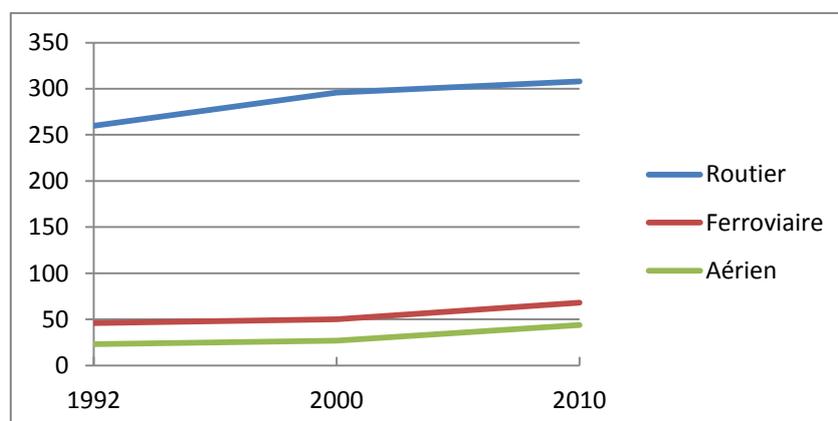
Figure 12 : Evolution du trafic de passagers entre 1992 et 2000 en indice (base 100 : 1992)



Cependant, d'autres facteurs peuvent expliquer cette croissance. Côté ferroviaire, on attribue traditionnellement cette performance à l'effet TGV⁶. Le développement du réseau LGV et la définition de nouveaux services aux voyageurs liés à la grande vitesse y ont grandement contribué. Côté aérien, la libéralisation du secteur aérien a permis l'arrivée de nouveaux opérateurs et services associés à une baisse des prix sur la période⁷ favorable à une plus grande demande. Cette dynamique s'est trouvée renforcée par un accroissement des distances domicile – lieu de vacances favorable à l'aérien, les déplacements autres que pour un motif professionnel représentant 63% des flux aériens en 2010.

Néanmoins cette croissance des modes rapides non routiers doit être relativisée en valeur absolue. Leur volume en passagers-kilomètre reste modeste pour une part modale de 26% en 2010. La voiture particulière conserve une position dominante avec 72% des flux.

Figure 13 : Evolution du trafic de passagers entre 1992 et 2010 (Gpkm)



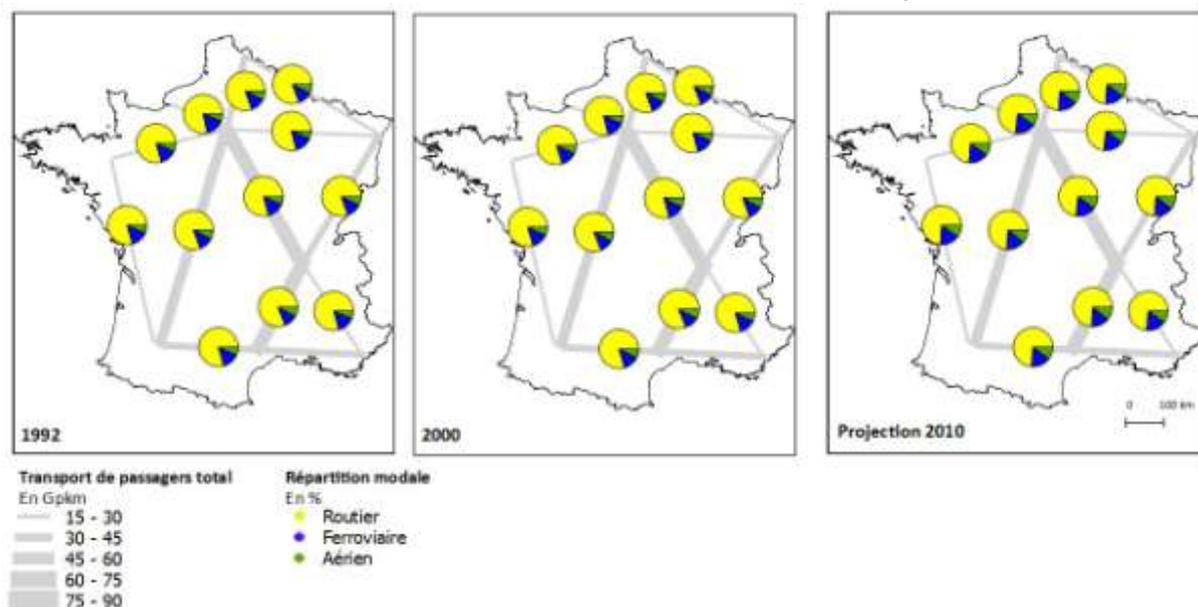
⁶ Référence sur effet TGV et progression des trafics + valeur temps : crozet

⁷ Référence sur effet libéralisation ?

Décomposition par axe

Les cartes suivantes illustrent la répartition des flux passagers sur la période 1992 - 2010 selon les 12 axes définis précédemment.

Figure 14 : Evolution du trafic passagers et de la part modale des principaux modes de transport en France entre 1992 et 2010 selon le modèle MEDEE (Gpkm)



L'axe Paris – Lyon représente l'essentiel du trafic passager en France. Il est suivi de l'axe 9 (basse vallée du Rhône) et de l'arc atlantique. Cette répartition des flux s'est renforcée sur la période sans remettre en cause l'ordre précité. La moindre représentation des autres axes révèle le développement en France d'un axe économique fort générateur d'une mobilité quotidienne sur l'axe Paris – Lyon – Marseille. Contrairement au transport de marchandises où la part du transit est importante et valorise largement la partie Est du territoire, le transport de voyageurs semble être soumis à une logique plus nationale. Le transit ne représente en moyenne que 14% du trafic passagers total en France en 2010.

Concernant la répartition modale, on n'observe pas de différence selon les axes. La progression des modes alternatifs au routier a été homogène sur l'ensemble du territoire. On n'observe pas non plus directement d'effet LGV, la part du ferroviaire étant aussi importante sur les axes équipés et non équipés. On peut supposer que cet effet est diffus sur l'ensemble du réseau et que la politique de la SNCF de ne pas cantonner les TGV aux seuls axes équipés a permis de valoriser le système ferroviaire voyageurs dans son ensemble.

Tendance selon les trois scénarios à 2050

Etat des lieux en 2050

La tendance observée sur 1992 – 2010 se confirme et s'amplifie à différents degrés selon les scénarios. Selon les tableaux suivants, le besoin en mobilité continue d'augmenter sur la période 2010 – 2050. Cette progression se traduit par une réduction des déplacements en

voiture et une augmentation conséquente du trafic ferroviaire. L'hypothèse d'un choix modal en fonction de la vitesse et de la valeur temps pour les liaisons inter-régionales semble être confirmée par les trois scénarios.

Le scénario Pégase rend le mieux compte du propos d'introduction. Fondé sur la satisfaction d'un besoin en déplacement et en vitesse toujours croissant (+ 111% en Gpkm entre 2010 et 2050), il favorise les transports rapides (73% du partage modal). La voiture ne compte plus que pour 27% en 2050. Il est intéressant de constater que si le mode ferroviaire représente 46% des déplacements longue-distance, le mode aérien atteint près de 25%. Enfin, si ce scénario présente la plus forte réduction des déplacements automobiles (-21%), il n'est pas sûr qu'il soit le mieux à même pour atteindre l'objectif de réduction par 4 de nos émissions de CO2 d'ici à 2050. Car, sans contraintes appliquées à la mobilité, il est aussi le scénario où les trafics ont le plus augmentés entre 2010 et 2050.

Figure 15 : Trafic total passagers longue distance selon Pégase – Phénix (Gpkm)

	2010	2050	Evolution (2010 - 2050)	Part modale 2050
Routier	308	244	-21%	27%
Ferroviaire	68	414	509%	46%
Aérien	44	230	423%	25%
Total	429	907	111%	100%

Sous l'effet d'une contrainte de la vitesse et d'un accroissement des BTT, Chronos anticipe une croissance moins soutenue des déplacements d'ici à 2050 (+50%). La part modale du ferroviaire atteint près de 56% tandis que la part du routier se réduit fortement et que l'aérien stagne. Ainsi, contrairement à Pégase, la recherche de vitesse se porte uniquement sur le ferroviaire où les vitesses moyennes pour le trafic de voyageurs sont déjà plus élevées que sur route. Cette dynamique s'autoalimente avec le développement du réseau LGV.

Figure 16 : Trafic total passagers longue distance selon Chronos – Pénélope (Gpkm)

	2010	2050	Evolution (2010 - 2050)	Part modale 2050
Routier	287	236	-18%	37%
Ferroviaire	101	360	256%	56%
Aérien	31	33	6%	5%
Total	428	643	50%	100%

Le scénario Hestia continue de marquer la rupture avec les deux précédents. La progression anticipée des flux y est plus faible (+31%) et le partage modal est le moins favorable au ferroviaire. La voiture continue de conserver une situation dominante bien que concurrencée de très près par le ferroviaire tandis que l'aérien voit sa part reculer. De manière générale, les besoins en mobilité pour ce scénario déclinent sous l'effet de contraintes fortes s'appliquant à l'ensemble des modes. Le découplage recherché se traduit par une rationalisation des lieux de vie (domicile – travail – loisirs), par un besoin en déplacement moindre et un renchérissement de la vitesse. Le besoin en vitesse est donc

moins sensible d'où une progression du mode ferroviaire moins forte que dans les autres scénarios et une réduction tendancielle du trafic aérien.

Figure 17 : Trafic total passagers longue distance selon Hestia – Cassandre (Gpkm)

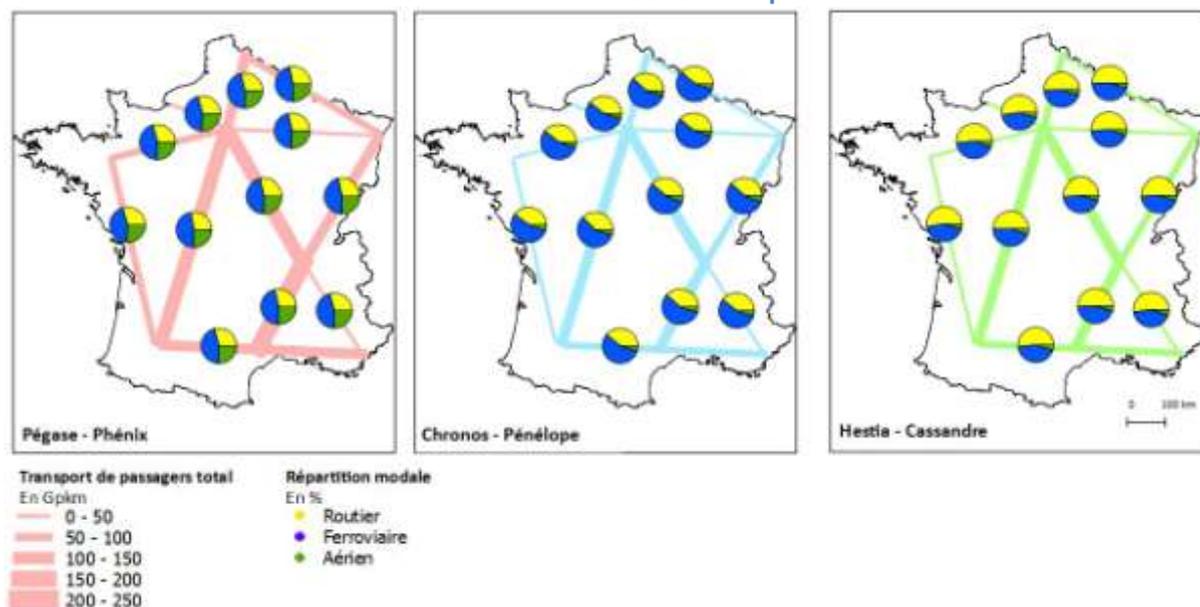
	2010	2050	Evolution (2010 - 2050)	Part modale 2050
Routier	318	276	-13%	49%
Ferroviaire	71	243	242%	43%
Aérien	31	28	-10%	5%
Total	429	560	31%	100%

Notre rapport à l'espace semble donc dicter en grande partie nos besoins en mobilité. Sans contraintes particulières et dans un contexte de croissance continue, le besoin en mobilité a tendance à augmenter du fait de l'accroissement des opportunités d'activité. Ce besoin se traduit dans les transports par une augmentation des vitesses d'où l'avantage donné aux modes rapides (TGV, aérien). Il n'est pas exclu qu'il y ait un maximum à cette dynamique. Mais Hestia nous montre que même dans un souci de découplage et de contraintes fortes en matière de mobilité, le volume des déplacements s'accroît tendanciellement selon le PIB.

Décomposition par axe et scénario

La cartographie des données révèle une permanence dans la surreprésentation de l'axe Paris-Lyon-Marseille et de l'arc atlantique pour l'ensemble des projections. Concernant la répartition modale, Pégase – phénix offre de la vitesse tandis que Chronos – pénélope compense la restriction des vitesses par plus de ferroviaire et Hestia – cassandre propose un découplage reposant sur un équilibre train/voiture.

Figure 18 : Trafic passagers et part modale des principaux modes de transport en France en 2050 selon le modèle MEDEE-Transport



3 Conséquences des projections de trafic sur la congestion et les besoins d'infrastructures nouvelles

L'objet de cette partie est de confronter les sorties du modèle à la réalité des infrastructures en termes de capacité. Nous déterminerons pour chaque axe un taux d'utilisation de l'infrastructure routière et ferroviaire en 2050. En d'autres termes, ce travail revient à évaluer le niveau de congestion des différentes infrastructures à l'horizon 2050 et, en cas de saturation, à proposer des solutions pour limiter la congestion. Nous commencerons par définir le principe de congestion, puis nous présenterons la méthode suivie pour l'évaluer pour enfin débattre des résultats.

3.1 La notion de congestion dans le secteur des transports

Le principe de congestion s'applique usuellement au secteur routier. Il désigne une externalité négative majeure reposant sur l'existence d'une relation entre le niveau d'utilisation de l'infrastructure et son débit (fonction temps-débit). Plus le taux d'utilisation de l'infrastructure est élevé, plus le risque de ralentissement est élevé. Cette réduction de la vitesse moyenne entraîne des retards entre le temps théorique de parcours et le temps réel mais aussi des phénomènes de « désheutage » liés à un report des déplacements. En France, le Sétra⁸ a publié en 2009⁹ une note d'information où la congestion routière est définie en termes de « temps gêné ». Un véhicule est considéré comme gêné à partir du moment où il « *subit la contrainte du véhicule prédécesseur* ». Nous reviendrons sur cette notion pour notre évaluation de la congestion routière à l'horizon 2050.

Le principe de congestion est moins usité dans la sémantique ferroviaire. On préfère parler de « rareté » pour une activité planifiée. Le système a longtemps été considéré autorégulateur étant de fait un monopole verticalement intégré (du gestionnaire de l'infrastructure à l'opérateur ferroviaire). Or, le processus récent de séparation verticale des activités et de mise en concurrence de différents opérateurs sur un même réseau fait apparaître de nouvelles externalités dont celle de congestion.

Les travaux de recherche sur le phénomène de congestion dans le secteur ferroviaire restent rares. Le principe a été plus développé pour le trafic aérien suite au processus de libéralisation du secteur aux Etats-Unis et en Europe (Carlin et Park, 1970, Morrison et al., 1989, Nombela Merchan et De Rus, 2006). Dans le prolongement de ces travaux, l'étude menée par Gibson et al. (2002) pour le compte du gestionnaire de réseau britannique montre qu'il existe dans le ferroviaire une relation statistique significative entre la densité de trafic et la durée de retard. Cette relation a également été mise en évidence par RFF (2012) qui a relevé en différents points de son réseau un accroissement significatif des écarts entre horaire prévu et horaire réel de passage selon la densité du trafic.

⁸ Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra)

⁹ Sétra (2009), *Approche de la congestion routière : Méthode de calcul du temps gêné*, Note d'information, Transports 05

Figure 19 : Courbe débit – irrégularité ferroviaire

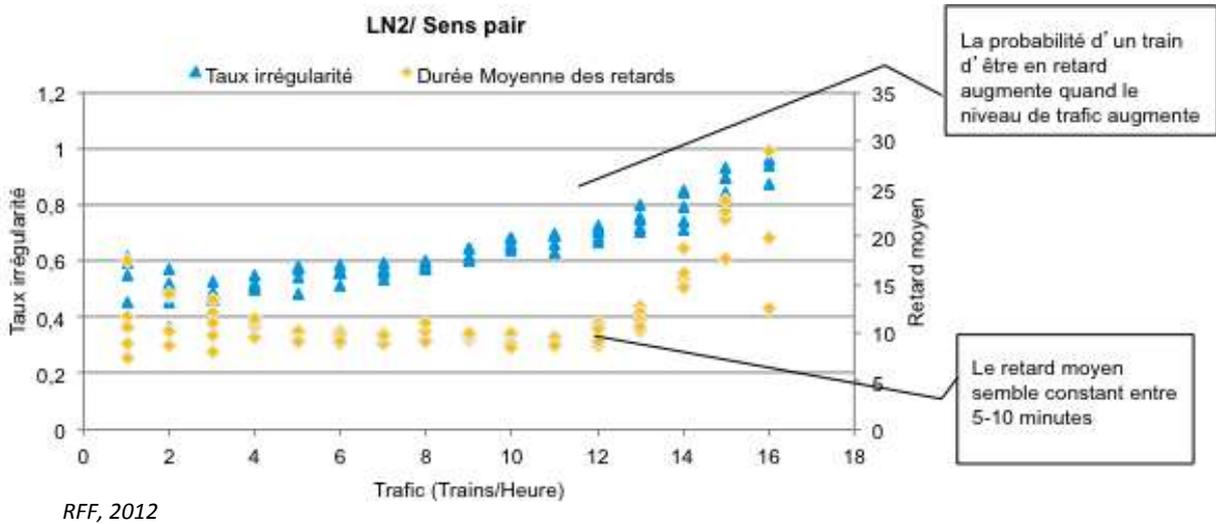
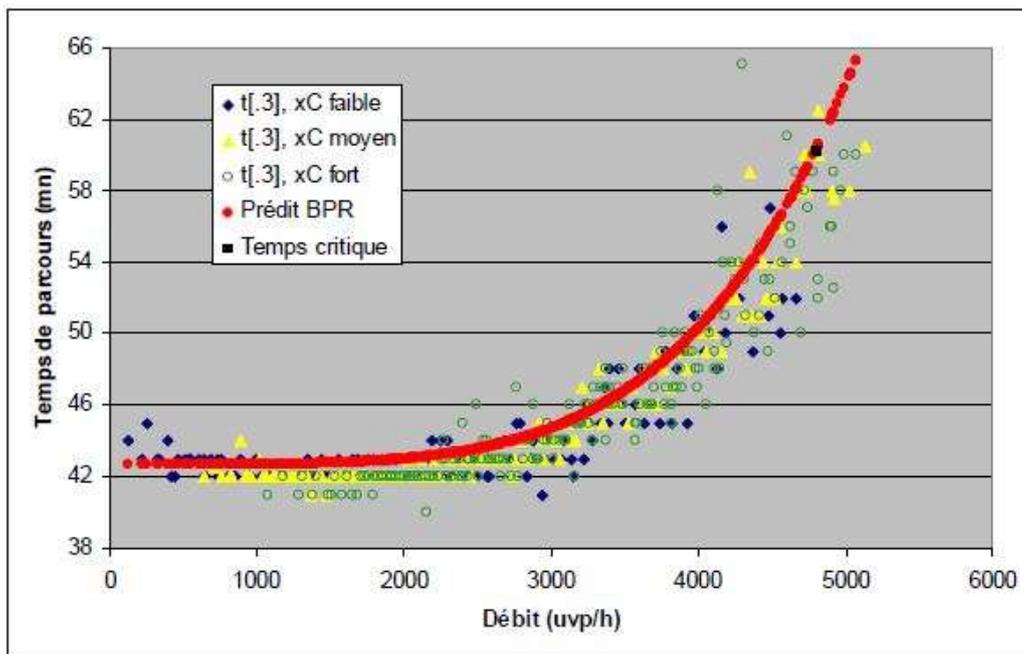


Figure 20 : Courbe débit – temps routier



Ces travaux valident l'hypothèse selon laquelle le transport ferroviaire n'échappe pas au phénomène de congestion. Ce phénomène se pose avec d'autant plus d'acuité que le gestionnaire d'infrastructure doit maintenant le monétariser pour argumenter ses variations tarifaires entre heure de pointe et heure creuse. La nouvelle autorité de régulation ferroviaire (ARAF) créée en France en 2009 selon le droit européen a soulevé la question de la congestion dans son premier avis sur la tarification du réseau français en 2012. Selon elle, la congestion « constitue un obstacle majeur au bon fonctionnement du système français et à l'accès au réseau ». Il est donc impératif selon elle « que la redevance de réservation des

sillons renvoie un signal pertinent sur leur niveau d'utilisation ». Cette question est d'autant plus d'actualité que le projet de refonte du « premier paquet ferroviaire », voté par le parlement européen en mai 2012, incite à une plus grande compréhension et transparence des prix.

Notre étude s'inscrit donc dans ce questionnement théorique nouveau pour le secteur ferroviaire. Afin de tester les résultats de nos scénarios selon la capacité des infrastructures, nous avons souhaité développer une méthodologie pour estimer le taux d'utilisation des capacités ferroviaires en France. Pour cela, nous nous sommes fortement inspiré de la méthodologie développée pour le routier tout en tenant compte de certaines spécificités liées au ferroviaire que nous présenterons dans la suite de l'étude.

3.2 Analyse de la congestion: éléments de méthode

Nous commencerons par présenter la méthodologie suivie pour estimer le niveau d'utilisation des infrastructures routières. L'activité de recherche dans ce domaine est ancienne et la méthodologie développée par le Sétra peut être considérée robuste. Nous présenterons ensuite notre méthode définie pour le ferroviaire.

3.2.1 La congestion du réseau routier

L'objet de cette méthode est de définir un niveau d'utilisation des principaux axes autoroutiers en France selon les résultats des scénarios du modèle VLEEM-TILT. Le Sétra utilise l'indicateur de « temps gêné » pour mesurer la congestion routière. Selon sa définition, « *le temps gêné est le temps passé par les VL en état ralenti. Cet indicateur présente l'état moyen de congestion pour des périodes en régime non saturé [...]. La principale hypothèse simplificatrice est de considérer qu'en situation de gêne, les VL roulent à la vitesse libre des PL, car ils ne se trouvent pas en situation saturée mais sont gênés par les PL* »¹⁰. Ainsi, les caractéristiques de l'infrastructure et le pourcentage de poids lourds dans la composition des flux vont fortement impacter le calcul du temps gêné.

Détermination des itinéraires

Un premier travail de caractérisation des axes a été nécessaire pour définir leur capacité. Les itinéraires précités dans la première partie de l'étude ont été mis à jour et identifiés. Seul le réseau autoroutier a été pris en considération, l'étude portant sur les trajets longue-distance.

¹⁰ Sétra (2009), *Approche de la congestion routière : Méthode de calcul du temps gêné*, Note d'information, Transports 05

La définition d'itinéraire a permis de déterminer un nombre de kilomètre pour chaque axe. Cette donnée est utile pour traiter les résultats de nos scénarios et convertir les Vkm/an en V/an.

Présentation de la méthode Sétra

Le calcul du temps gêné pour les VL s'effectue à partir des trafics moyens journaliers annuels (TMJA) selon la formule suivante :

$$B' = (\gamma + 1) / \left(\gamma + \left[\frac{\kappa_{uvp}}{x_{uvp}} \right]^\alpha \right)$$

On a α et γ pour caractériser les différents types de route, κ_{uvp} pour la capacité de l'infrastructure et x_{uvp} pour le débit horaire de véhicules.

Si on considère le tableau de paramétrage de la formule ci-dessous, on a pour chaque type de route χ_{VL} et χ_{PL} pour le taux de concentration moyen de débit horaire VL et PL, τ_{VL} et τ_{PL} pour le temps de parcours unitaire d'un VL ou PL sur une route à vide et le coefficient d'équivalence PL/VL s'appliquant aux PL pour réduire le déséquilibre entre le taux d'occupation d'un VL et PL.

Calcul du débit horaire de véhicules

Deux formules existent pour déterminer le débit horaire moyen PL et VL (x_{uvp}).

La première formule consiste à agréger les débits horaires VL et PL selon le coefficient d'équivalence « e » pour traduire le surplus d'encombrement d'un PL par rapport à un VL.

$$X_{uvp} = X_{VL} + e.X_{PL}$$

La lecture de cette formule est simple mais son résultat ne traduit pas les variations de trafic sur une journée, source de congestion.

Une seconde formule, plus complète est développée. Elle permet par agrégation des données PL et VL et l'utilisation de coefficients de concentration (χ_{VL} et χ_{PL}) de relier au TMJA la connaissance des 8760 heures d'une année.

Le Sétra présente les égalités suivantes :

$$\bar{X}_{veh} = TMJA / 24$$

$$\tilde{x}_{uvp} = \bar{X}_{veh} (\chi_{vl} \cdot (1 - p) + p \cdot e \cdot \chi_{pl})$$

p désigne le % PL

Pour la projection des scénarios, la seconde formule a été retenue. Elle traduit le mieux l'hétérogénéité du trafic selon la composition des flux et leur niveau de concentration sur un temps donné.

Grille de lecture des résultats

Le Sétra, sur la base de ses observations, a défini une grille de lecture et d'analyse du temps gêné. De manière générale, le pourcentage de temps gêné sur un itinéraire fait référence à un niveau de congestion. Le TMJA change quant à lui selon les caractéristiques des axes et du pourcentage de poids lourds. A titre d'exemple, le TMJA calculé pour le tableau ci-dessous s'applique pour une 2x3 voies dont les trafics sont composés à 15% de PL.

Figure 21 : Grille de lecture de la congestion routière

Caractérisation de la situation	Pourcentage temps gêné pour les VL en moyenne annuelle	TMJA (véh/j) 2 sens	Fréquence moyenne des saturations	Pourcentage temps perdu pour les VL en moyenne annuelle
Fluide	< 10 %	< 62 000	Des ralentissements ou des attentes de courte durée ne sont pas exclus, mais ils ne sont pas localisés	< 3 %
Dégradée	10 à 20 %	62 000 à 70 000	Hors été, la saturation apparaît en moyenne 1 jour sur 20, principalement aux périodes de fêtes et vacances scolaires	3 % à 7 %
Fortement dégradée	20 à 45 %	70 000 à 81 000	Hors été, la saturation apparaît en moyenne 2 jours par mois, principalement aux périodes de fêtes et vacances scolaires	7 % à 16 %
Très fortement dégradée	> 45 %	> 81 000	Hors été, la saturation apparaît en moyenne 3 jours par mois aux périodes de fêtes et vacances scolaires et certains jours ouvrables	> 16 %

Sétra (2009), *Approche de la congestion routière : Méthode de calcul du temps gêné*, Note d'information, Transports 05

3.2.2 La congestion du réseau ferroviaire

L'étude du phénomène de la congestion dans le secteur ferroviaire est récente. Si quelques publications scientifiques ont abordé la question de la tarification de la congestion ferroviaire (Quinet, 2003 ; Nash et Matthews, 2005 ; RFF, 2012) ou de l'existence d'une courbe débit-temps dans le ferroviaire (Gibson et al., 2002 ; RFF, 2012), peu ont proposé une méthodologie pour définir le taux d'utilisation d'une infrastructure ferroviaire (Sétra, 2009).

C'est pourquoi nous proposons de définir une méthode pour estimer le taux d'utilisation d'une infrastructure ferroviaire.

Cette méthode pose avant tout la question de savoir comment restituer au mieux l'hétérogénéité du réseau ferroviaire pour estimer la capacité de chacun des axes ?

Définition des axes

La caractérisation des axes pour permettre la conversion des trains-kilomètre/axe en trains/axe a été réalisée selon deux principes : le réseau est hétérogène (LGV, ligne fret, etc.) et segmente les flux selon leur nature (voyageur grande vitesse, marchandises, etc.).

Dans le souci de restituer au mieux la réalité du réseau pour chacun de nos axes, nous avons défini la typologie suivante :

- Réseau fret (R_f) : ensemble du réseau excepté les LGV (exclusivement voyageurs)
- Réseau primaire (R_1) : inclus les LGV et lignes les plus circulées
- Réseau secondaire (R_2): hors LGV et lignes à moindre trafic

Ces trois catégories permettent de tenir compte de l'hétérogénéité du réseau et de la concentration des flux sur certains segments de l'axe.

Pour les besoins de l'étude, on ne considère que les lignes empruntées pour des flux interurbains voyageurs ou marchandises.

Calcul du débit horaire par axe

Les résultats bruts du modèle se présentent sous la forme de tonnes-kilomètre et passagers-kilomètre par an à convertir en trains par heure.

Conversion des tonnes-kilomètre en trains horaire

Conversion des tonnes-kilomètre (TKM) en trains-kilomètre (TK_f) :

$$TK_f = TKM / Q_f$$

Où Q_f est la quantité moyenne en tonnes transportée par un train de fret.

Conversion des trains-kilomètre en trains par axe (TA_f) :

$$TA_f = TK_f / R_f$$

Où R_f (réseau fret) est exprimé en km

Pour obtenir le nombre de TA_f par heure (TA_{fh}), on divise TA_f par le nombre d'heure exploitables (H_f) pour les activités de fret ferroviaire sur 365 jours, soit 8760h si on considère que le service est opérationnel 7/7j et 24/24h.

On obtient la formule suivante :

$$(1) TA_{fh} = [(TKM / Q_f) / R_f] / H_f$$

Conversion des passagers-kilomètre en trains

Conversion des passagers-kilomètre (PKM) en trains-kilomètre (TK_p) :

$$TK_p = PKM / Q_p$$

Où Q_p est la quantité moyenne en passagers transporté par un train de passagers

Conversion des TK_p en trains par axe (TA_p)

$$TA_p = TK_p / R_p$$

Ou

$$TA_p = [(TK_p * \chi) / R_1] + [(TK_p * \gamma) / R_2]$$

A la différence du fret, on a choisi de distinguer le réseau primaire du réseau secondaire pour chacun des axes quand cela était possible. Cette séparation nous permet de restituer au mieux la concentration des flux sur quelques axes.

On considère que χ % du trafic total se concentre sur R_1 et γ % sur R_2 où $R_{(p)}$ est la distance en km du réseau opérable de chaque axe pour le transport de passagers.

Pour obtenir le nombre de TA_p par heure (TA_{ph}), on a divisé TA_p par le nombre d'heures exploitables (H_p) pour le service de passagers sur 365 jours, soit 6570h si on considère que le service est opérationnel 7/7j et 18/24h (de 5h30 à 23h30).

$$TA_{ph} = TA_p / H_p$$

On obtient la formule suivante :

$$(2) TA_{ph} = [((PKM/Q_p) * \chi) / R_1] + [((PKM/Q_p) * \gamma) / R_2] / H_p$$

Calcul de la capacité des infrastructures

Selon une étude menée par le Sétra¹¹ on considère la capacité d'une infrastructure en termes de « capacité pratique » (C_p) par opposition à la « capacité théorique » (C_T).

¹¹ SETRA, *Le transport ferroviaire de voyageurs sur le réseau ferré national français : exploration d'un système complexe*, Synthèse des connaissances, 2009

« Cette notion de « capacité pratique » tient compte d'une marge dite de « souplesse » afin d'éviter la saturation et les retards en cascade en cas d'incidents » (Sétra, 2009)

$$C_p = k * C_T$$

Où k est le coefficient de souplesse et appartient à l'intervalle]0 ;1[.

Pour déterminer la capacité des infrastructures, nous avons considéré pour chaque axe le point le plus étroit (comptant le moins de capacité) hors nœud ferroviaire.

Trois types de lignes ont pu être identifiés :

- LGV : dans le cas où l'ensemble du trafic grande – ligne est opéré sur LGV
- Mixte : pour les lignes classiques
- Fret : dans le cas où une LGV remplace l'ancien trafic grande – ligne

Le coefficient k s'applique à chacun des types de ligne.

Comme précisé en introduction, le modèle ne considère que le trafic marchandise et grande ligne. Or, le trafic régional a connu une croissance forte cette dernière décennie et devrait continuer sa progression à l'horizon 2050.

Un coefficient (α) a donc été déterminé pour représenter le trafic régional et traduire son impact sur les infrastructures en termes de capacité. Ce coefficient s'applique aux lignes mixtes et fret et peut être modifié au cas par cas.

Chaque axe est composé au maximum de deux itinéraires comme présenté ci-dessous.

Figure 22 : Définition des itinéraires par axe en 2010

	LGV	Mixte	Fret/TER
Axe 1	X	X	
Axe 2		X	
Axe 3	X		X
Axe 4		X	X
Axe 5		X	
Axe 6		X	
Axe 7		X	
Axe 8		X	
Axe 9		X	
Axe 10	X		X
Axe 11	X		X
Axe 12		X	X

On obtient donc la formule suivante pour déterminer la capacité pratique (C_p) de chaque itinéraire :

(4) Pour les lignes mixtes et fret : $C_p = [(C_T - (C_T * \alpha))] * k$

(5) Pour les LGV : $C_p = C_T * k$

Estimation de la congestion ferroviaire

Calcul du taux d'utilisation des infrastructures par axe

Nous considérons que la congestion (C_o) d'une infrastructure est le rapport entre sa capacité pratique et sa charge de trafic.

$$(6) \text{ Dans le cas où un axe} = 1 \text{ itinéraire : } C_o = [((Ta_{fh} * \lambda_f) + (Ta_{ph} * \theta_p)) / C_p] * 100$$

$$(7) \text{ Dans le cas où un axe} = 2 \text{ itinéraires : } C_o = [((Ta_{fh} * \lambda_f) + (Ta_{ph} * \theta_p)) / (C_{p1} + C_{p2})] * 100$$

Où λ_f et θ_p sont les coefficients de concentration, respectivement, pour la circulation fret et passagers.

Le choix a été fait de s'inspirer directement des coefficients de concentration mis en évidence dans la méthode routière (Sétra, 2009), pour simuler les heures de pointe dans le trafic ferroviaire.

3.3 Impacts de la dynamique des trafics sur la congestion

Cette dernière section présente le taux d'utilisation estimé à l'horizon 2050 de chaque axe. Pour chaque scénario, les données ont été traitées selon les méthodes précédemment définies. Les hypothèses retenues seront rappelées puis les résultats discutés.

3.3.1 Trafics routiers et congestion du réseau routier

Présentation des hypothèses

Le tableau ci-dessous résume les paramètres retenus par le Sétra pour le calcul de capacité d'une infrastructure. Ces valeurs ont été définies sur la base d'observations et de calculs économétriques. Elles peuvent varier fortement d'un tronçon à un autre selon ses caractéristiques (nombre de voie, pente, vitesse autorisée, courbes, etc.). Le Sétra propose une grille de valeurs simplifiée pour appréhender cette diversité. Pour chaque grand type de route, des valeurs moyennes ont été définies. De manière générale, le débit moyen d'une voie routière est estimé à 1750 véhicules/heure et le coefficient d'équivalence PL/VL est fixé à 2,5 sur autoroute et route express. Cette valeur est légèrement supérieure sur route à 2 voies en raison de la moins grande surface disponible pour circuler.

Figure 23 : Paramètres retenus par types de routes selon le Sétra

Types de routes	Facteurs de concentration		Paramètres de la fonction temps-débit					Coefficient équivalence PL / VL
	χ_{VL}	χ_{PL}	α	γ	τ_{VL} mn/km	τ_{PL} mn/km	κ_{uVP} uvp/h	
Autoroute à 2 x 2 v	2,7	1,1	4	0,45	0,46	0,667	1750 x 2	2,5
Autoroute à 2 x 3 v	2,6	1,1	6	0,45	0,46	0,667	1750 x 3	2,5
Autoroute à 2 x 4 v	2,6	1,1	6	0,45	0,46	0,667	1750 x 4	2,5
Route Express à 2 x 2 v	2,6	1,1	4	0,295	0,545	0,706	1750 x 2	2,5
Route Bidirection à 2 v	1,8	1,4	1,81	0,391	0,659	0,916	1750	3
Route Bidirection à 3 v	1,7	1,4	1,65	0,497	0,6	0,898	1750 x 1,4	3

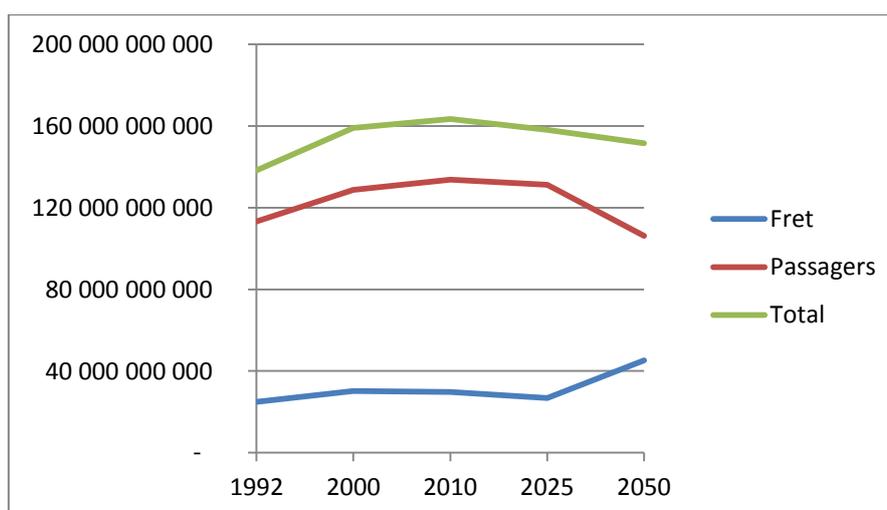
Sétra (2009), Approche de la gestion routière : Méthode de calcul du temps gêné, Note d'information, Transports 05

Présentation des résultats

Les trois scénarios prévoient unanimement une diminution générale du trafic routier en France à l'horizon 2050. Le pic de trafic serait atteint en 2010 avec 163 Gvkm contre 138 Gvkm en 1992 et 151 Gvkm en 2050 pour le scénario le plus favorable au transport routier (Pégase - phénix).

Comme l'indique le graphique suivant, l'augmentation du trafic routier de marchandise dans le meilleur des cas ne suffit pas à compenser la chute des trafics voyageurs.

Figure 24 : Evolution du trafic routier à l'horizon 2050 selon Pégase – Phénix (en vkm)

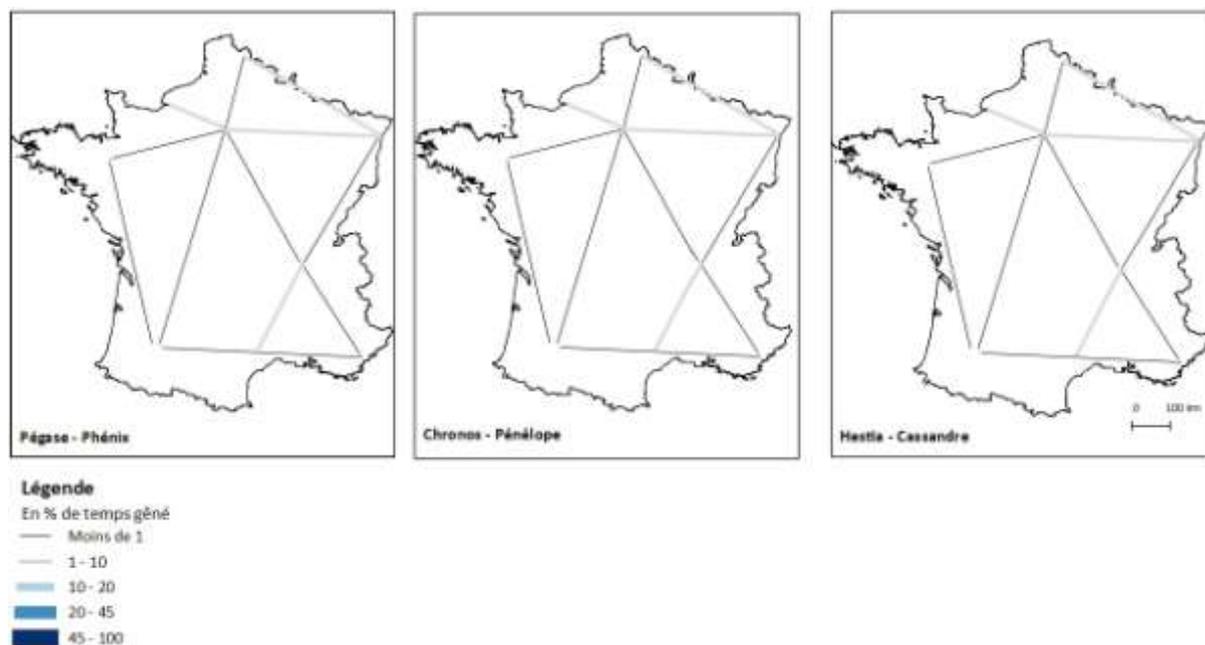


Par conséquent, les problèmes de congestion devraient se résorber d'eux-mêmes à l'horizon 2050 à niveau constant d'infrastructure. D'une part, la baisse du trafic voyageur devrait réduire le niveau d'hétérogénéité des flux, spécialisant les axes autoroutiers vers le transport de marchandises. D'autre part, la situation en 2010 révèle déjà un faible niveau de

congestion sur les principaux axes du réseau autoroutier hors nœuds urbains, barrières de péage ou circulation dégradée pour cause exceptionnelle (travaux, accidents, etc.).

La série de carte suivante illustre cette analyse. La proportion de temps gêné observée est très faible sur l'ensemble du réseau.

Figure 25 : Estimation de la congestion routière par axe en 2010 selon les scénarios



Selon ces résultats, l'avenir du réseau autoroutier français ne semble pas résider pas dans la recherche d'un accroissement des capacités, mais plutôt dans la recherche d'une gestion optimisée des capacités existantes. Cependant, ces résultats ne signifient pas pour autant que tout investissement de capacité pour le réseau routier est devenu inutile. Cette étude concerne uniquement le réseau national, les réseaux régionaux et locaux pouvant connaître des problèmes de saturation à l'horizon 2050. Ainsi, dans le cas du scénario Hestia, la réorganisation des lieux de vie selon le principe de proximité et la baisse du trafic routier longue-distance pourrait accroître la charge des nœuds urbains.

Par ailleurs, des investissements pourront être également nécessaires pour une éventuelle redéfinition des services autoroutiers. Le principe d'autoroute électrifiée actuellement testé en Allemagne par Siemens constitue une possibilité de reconversion pour les principaux axes (Bougnoux, 2011)¹². Les voies seraient équipées de caténaires et les véhicules de pantographe. Un tel système présente l'intérêt de mutualiser la consommation énergétique pour les longs trajets tout en laissant une autonomie pour les trajets de proximité. Les ruptures de charge observées dans le transport combiné rail/route disparaissent et le développement d'attelages virtuels entre poids lourds rend possible le développement de « trains routiers électriques » au sens propre du terme.

¹² Bougnoux B., (2011), « Demain, des autoroutes électrifiées ? », *Futuribles, analyse et prospective*, n°378

Par conséquent, la logique d'un report modal route/rail pourrait s'inverser, libérant de la capacité ferroviaire pour les voyageurs et spécialisant progressivement le mode ferroviaire vers le trafic de voyageurs et le mode routier vers celui de marchandises.

3.3.2 Trafics ferroviaires et congestion du réseau ferré

Contrairement au transport routier, l'ensemble des scénarios s'accordent sur une croissance forte du transport ferroviaire à l'horizon 2050. Le risque de saturation pour le réseau est élevé dès 2025 si l'infrastructure et les règles d'exploitation n'évoluent pas. Pour mieux identifier ce besoin, trois scénarios ont été définis selon de grandes perspectives d'évolution du système ferroviaire. Ils regroupent chacun des paramètres différents et s'appliquent, selon la méthode précédemment définie, aux résultats du modèle « MEDEE – transport »

Présentation des simulations

Ces simulations ont pour but de tester nos résultats selon des conditions d'exploitation et d'infrastructure différentes.

Simulation 1 dite de « référence »

La simulation S1 est dite de référence. Les hypothèses retenues se rapprochent des conditions connues et observées en 2010.

Simulation 2 dite de « matériel roulant »

La simulation S2 teste une amélioration en capacité d'emport des matériels roulants pour le transport de fret et de passagers. Les conditions d'exploitation et d'infrastructure de 2010 sont maintenues. On considère que les modifications à la marge en exploitation et en infrastructure nécessaires pour permettre le doublement des convois sont incluses dans les travaux de régénération du réseau.

Le matériel roulant implique les hypothèses de tonnes et passagers par train.

Simulation 3 dite « d'exploitation »

La simulation 3 dite « d'exploitation » anticipe à l'horizon 2050 les évolutions possibles en termes d'exploitation du réseau. Les projets d'investissement en développement de

l'infrastructure, principalement liés au SNIT¹³, ne sont pas considérés tout comme d'éventuelles améliorations en termes d'emport du matériel roulant.

L'exploitation du réseau implique les hypothèses suivantes : passagers et tonnes par train, plage horaire d'opérabilité du réseau et capacité d'une ligne (nombre de train/h, souplesse du réseau et concentration des trafics).

La principale évolution attendue est l'implémentation du système européen de signalisation ERTMS niveau 2¹⁴ sur l'ensemble du réseau grande ligne procurant un gain en capacité et en souplesse important. On considère que la migration vers ce nouveau système est facilitée par les travaux de régénération du réseau.

Enfin, il est supposé que la mise en concurrence progressive du réseau grande ligne devrait accroître sensiblement la concentration des trains, notamment voyageurs, en heure de pointe.

Simulation 4 dite « d'infrastructure »

La simulation 4 dite « d'infrastructure » prend en compte uniquement l'évolution du réseau anticipée à l'horizon 2025-2030 sur la base du SNIT. Seuls les projets inscrits au SNIT et déclarés « à engager avant 2020 » ont été pris en compte. Hypothèse est faite qu'ils seront tous réalisés en 2050. Cette sélection représente 68% du SNIT en termes de projets.

Figure 26 : Projets du SNIT déclarés « à engager avant 2020 »

- (1) LGV SEA Tours - Bordeaux
- (2) LGV SEA Bordeaux - Toulouse
- (3) LGV SEA Bordeaux - Espagne
- (4) LGV SEA Poitiers - Limoges
- (5) LGV Bretagne Pays-de-la-Loire
- (6) Contournement Nîmes - Montpellier
- (7) Ligne nouvelle Montpellier - Perpignan
- (8) LGV Provence Alpes Côte d'Azur et prolongement vers l'Italie
- (9) LGV Est seconde phase
- (10) LGV Rhin-Rhône 2nde phase branche est
- (11) LGV Rhin-Rhône branche Ouest
- (12) LGV Rhin-Rhône branche Sud
- (13) Interconnexion Sud Ile-de-France
- (14) Lyon - Turin
- (15) Contournement ferroviaire de l'agglomération lyonnaise
- (16) LGV Paris - Normandie
- (17) Liaison ferroviaire Roissy - Picardie
- (18) Desserte de Vatry
- (19) CEVA liaison Genève - Annemasse

¹³ Schéma National des Infrastructures de Transport

¹⁴ Système de signalisation ferroviaire au standard européen. On considère ici un ERTMS niveau 2 avec blocs virtuels à distance relative de freinage. La conduite automatique des trains propre à un ERTMS de niveau 3 n'est pas prise en compte.

Les conditions d'exploitation définies en 2010 sont conservées à l'horizon 2050 tout comme les capacités d'emport du matériel roulant. Seuls les paramètres liés à l'infrastructure changent. Cela concerne le kilométrage, la définition des itinéraires par axe et le coefficient k qui s'améliore légèrement du fait d'une plus grande homogénéité des circulations.

Simulation 5 dite « d'exploitation et d'infrastructure »

La simulation 5 dite « d'exploitation et d'infrastructure » est une synthèse des simulations 3 et 4. Elle considère l'extension du réseau liée au SNIT tout en reprenant les hypothèses d'exploitation du S3. On suppose que la réalisation de nouvelles infrastructures devrait s'accompagner de meilleures conditions d'exploitation avec d'une part des règles plus souples (introduction d'ERTMS niveau 2, matériel roulant plus performant, etc.) et d'autre part une plus grande homogénéité des trafics.

Cette simulation reprend donc en grande partie les hypothèses d'exploitation de la simulation 3 et impacte en particulier deux types d'hypothèses :

- La caractérisation du réseau en termes de kilométrage (lignes nouvelles, etc.)
- La caractérisation des axes en termes de lignes disponibles (LGV/Ligne Mixte¹⁵/Ligne Fret)

Simulation 6 dite « d'exploitation, d'infrastructure et de matériel roulant »

La simulation 6 permet une lecture complète des effets d'une évolution globale à l'horizon 2050 du système ferroviaire. Cette simulation prend en compte à la fois les évolutions décrites précédemment en termes d'exploitation (ERTMS niveau 2), d'infrastructure (SNIT) et de matériel roulant (Duplex, AGV, etc.).

Présentation des hypothèses

La présentation des valeurs reprend l'ordre retenu dans la table des hypothèses ci-dessous.

¹⁵ La Ligne mixte accepte tous les types de trafics tandis que la LGV n'accepte que les circulations TGV et la ligne fret le transport de fret et de voyageurs régionaux

Figure 27 : Table des hypothèses ferroviaires

	S 1 (référence)	S 2 (matériel roulant)	S 3 (exploitation)	S 4 (infrastructure)	S 5 (exploitation et infrastructure)	S 6 (exploitation, infrastructure et matériel roulant)
Hypothèses train/axe						
Passagers/train	320	750	320	320	320	750
Tonnes/train	400	800	400	400	400	800
Infrastructure [1]	situation 2010	Sans SNIT	Sans SNIT	Avec SNIT	Avec SNIT	Avec SNIT
Ventilation trafic R1-R2						
<i>R1</i>	0,7	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9
<i>R2</i>	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
Heures opérationnelles						
<i>Fret</i>	8030	8030	8760	8030	8760	8760
<i>Voyageurs</i>	6570	6570	6935	6570	6935	6935
Hypothèses capacité						
Capacité LGV	15	15	20	15	20	20
Capacité classique	14	14	20	14	20	20
Occupation TER	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Typologie itinéraires/axe	<i>cf. tableau annexe</i>					
Coefficient k	0,75	0,75	0,8	0,8	0,85	0,85
Concentration fret	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Concentration voyageurs	1,6	1,6	1,8	1,8	1,8	1,8

Figure 28 : Typologie des itinéraires par axe

	S1 – S2 – S3			S4 – S5 – S6		
	LGV	Mixte	Fret/TER	LGV	Mixte	Fret/TER
Axe 1	X	X		X	X	
Axe 2		X		X		X
Axe 3	X		X	X		X
Axe 4		X	X	X		X
Axe 5		X		X		X
Axe 6		X		X		X
Axe 7		X		X		X
Axe 8		X		X		X
Axe 9		X		X		X
Axe 10	X		X	X		X
Axe 11	X		X	X		X
Axe 12		X	X		X	X

Hypothèses pour l'estimation du nombre de train/h

Cette première partie permet de convertir des tonnes et passagers-kilomètre en train par heure sur un axe.

a) Passagers et tonnes par train

On estime en 2007 qu'un train grande ligne emporte en moyenne 320 passagers ce qui équivaut à un taux de remplissage moyen pour les TGV de 75% (capacité moyenne d'un TGV : 423 passagers). Ces résultats ont été obtenus par division du nombre de passagers/km grande ligne sur le nombre de trains/km grande ligne en 2007¹⁶.

Le même calcul a été réalisé pour le fret ferroviaire. On obtient un tonnage moyen de 400 tonnes par train.

Selon les simulations, on considère deux situations. La première, non réaliste, n'inclue pas d'évolution de la capacité d'emport des matériels roulants. Cette simulation permet de mieux mesurer les effets propres à l'exploitation et l'infrastructure. La seconde, plus réaliste, considère que la capacité d'emport est doublée grâce à une amélioration à la fois des capacités d'emport du matériel (Duplex, AGV, etc.) et à une optimisation de la demande en période de pointe (tarification de la congestion).

b) Définition du réseau circulé par axe en kilomètres :

Une définition correcte des axes est nécessaire pour opérer la conversion des trains/km en trains/axe.

Le réseau ferroviaire est hétérogène et segmente les flux selon leur nature (LGV/Ligne classique ou mixte).

Dans le souci de restituer au mieux la réalité du réseau pour chacun de nos axes, nous avons défini la typologie suivante :

- Réseau fret (R_f) : ensemble du réseau excepté les LGV (+ 25 trains/jour)
- Réseau primaire (R_1) : inclus les LGV et lignes les plus circulées (+ 100 trains/jour)
- Réseau secondaire (R_2) : hors LGV et lignes à moindre trafic (entre 50 et 100 trains/jour¹⁷)

Le réseau est considéré constant pour les simulations S1, S2 et S3.

Pour les simulations S4, S5 et S6, le kilométrage de certains axes peut aller jusqu'à doubler suite à la réalisation des projets du SNIT.

c) Ventilation du trafic voyageur :

Ce résultat a été obtenu par division du nombre de trains/km grande vitesse sur le nombre total de trains/km voyageurs grande ligne en 2007.

La répartition des trafics se trouve modifiée dans les simulations S4, S5 et S6 en perspective de la réalisation du SNIT et du développement du réseau LGV (plus grande circulation des trafics interurbains sur LGV).

¹⁶ Selon données RFF, 2007 et Comptes des transports, 2007

¹⁷ Selon RFF, 2007

d) Plage horaire d'opérabilité du réseau :

En 2010, la plage horaire d'opérabilité du réseau est inférieure à 24h pour le fret et les voyageurs (plages travaux, heures d'ouverture et fermeture des gares voyageurs, etc.).

Par hypothèse, on considère une plage horaire de circulation de 22/24h pour le trafic fret et de 18/24h pour les voyageurs (5h30 – 23h30).

Dans les simulations S3, S5 et S6, l'amélioration anticipée des conditions d'exploitation permet de poser l'hypothèse d'une amplitude horaire de 24/24h pour le fret et de 19/24h pour les voyageurs (5h – 24h). La plage horaire des voyageurs pourrait être encore accrue si de nouveaux services étaient développés en matière de voyage grande vitesse de nuit.

Hypothèses de capacité

a) Capacité des voies :

La capacité théorique d'une LGV sous TVM 300 est estimée au mieux à 15 sillons/heure (un train toutes les 4min). Elle est d'environ 14 sillons/heure sur ligne classique (hétérogénéité forte des trafics et cantons de tailles importantes).

Dans les simulations S3, S5 et S6, le basculement du réseau principal vers l'ERTMS niveau 2 devrait permettre de gagner en capacité (20 sillons/heure) et en fiabilité dans la gestion des circulations.

b) Taux d'occupation du TER :

On estime que la part du TER dans l'ensemble du trafic ferroviaire (voyageur et fret) devrait rester sensiblement identique à la situation de 2010.

c) Caractérisation des axes par type de lignes :

Chaque axe est composé au maximum de deux itinéraires aux caractéristiques différentes. Il n'y a pas d'évolution entre les scénarios 1 et 2.

Les simulations S4, S5 et S6 révèlent une spécialisation plus forte des trafics avec une réduction du nombre de lignes mixtes et une augmentation du nombre de lignes LGV (cf. table hypothèses) et fret du fait de l'extension du réseau LGV. De plus en plus de parcours sont réalisés uniquement sur LGV.

Pour les lignes mixtes et fret, on applique le coefficient d'occupation du TER.

d) Coefficient K :

Selon le SETRA (2009), on distingue la capacité théorique de la capacité pratique d'une ligne¹⁸. La valeur proposée par le SETRA en 2009 est de 0,75 en heure de pointe (plus de trains circulent mais le risque de retard augmente). A titre d'exemple, la capacité théorique d'une LGV est de 15 sillons/heure en 2010 et sa capacité pratique d'environ 11 sillons/heure. Elle peut aller jusqu'à 13 sillons/heure en pratique sur la LGV Paris-Lyon mais le risque de retard en chaîne en cas d'incident est d'autant plus élevé.

Le coefficient k est revu à la hausse dans la simulation S3 où le basculement vers l'ERTMS niveau 2 permet une plus grande fiabilité et souplesse dans la gestion des sillons (meilleure connaissance de la circulation des trains, réduction de la taille des cantons, etc.). Le coefficient est également réévalué dans S4 en raison d'une meilleure séparation des trafics. Cette dynamique est renforcée dans S5 et S6 avec l'extension du réseau combinée au changement d'exploitation.

e) Concentration des trafics :

Le coefficient de concentration permet de traduire les variations d'intensité des trafics entre heure de pointe et heure creuse.

Cette notion a été reprise à la méthodologie développée par le SETRA (2009) pour définir la congestion routière¹⁹. Selon le SETRA, le niveau de concentration pour le fret est de 1,1 et de 2,8 pour les voyageurs.

On considère un niveau de concentration sensiblement identique pour le trafic de fret dans le cas du ferroviaire.

Pour le trafic voyageur, le transport ferroviaire étant une activité planifiée contrairement au transport routier, on estime que le niveau de concentration est plus faible dans la situation de référence en 2010 (1,6).

Mais on peut supposer à l'horizon 2025 que l'introduction de la concurrence pour les trafics voyageurs devrait relever sensiblement ce niveau de concentration, la demande des opérateurs en sillons en heure de pointe devenant plus importante.

Présentation des résultats

Situation en 2010

Selon la simulation S1, le réseau ferré français présente en 2010 un taux moyen d'utilisation de l'ordre de 50%. Ce taux a été déterminé d'après le paramétrage retenu pour le scénario dit de « référence ».

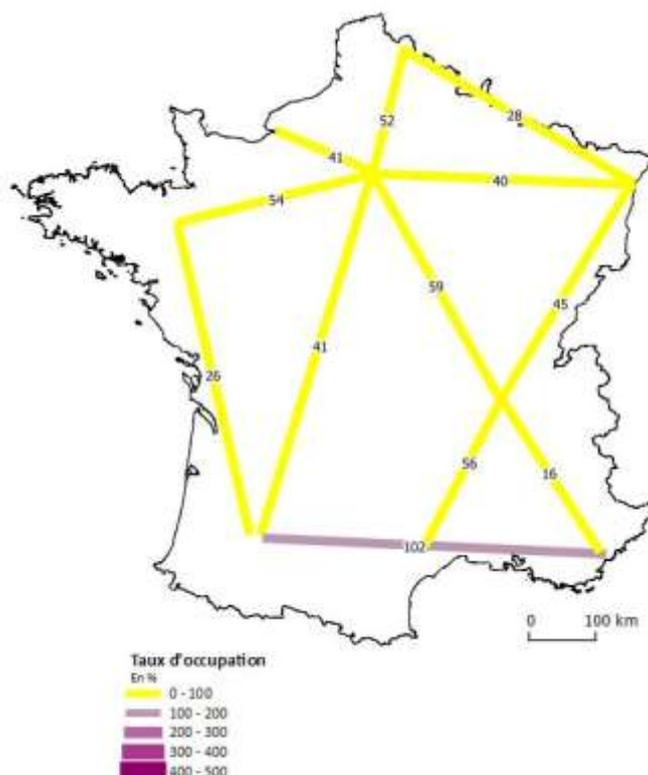
¹⁸ « Cette notion de « capacité pratique » tient compte d'une marge dite de « souplesse » afin d'éviter la saturation et les retards en cascade en cas d'incidents », SETRA, *Le transport ferroviaire de voyageurs sur le réseau ferré national français : exploration d'un système complexe*, Synthèse des connaissances, 2009

¹⁹ Sétra (2009), *Approche de la congestion routière : Méthode de calcul du temps gêné*, Note d'information, 8p.

Cependant, la répartition du trafic n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire. On observe un premier groupe d'axes, à plus de 50% d'utilisation qui comprend l'axe Nord, Bretagne – Pays de Loire et Paris – Lyon – Marseille. Un second groupe compris entre 40 et 50% d'utilisation inclue l'axe Seine, Paris – Bordeaux, la LGV Est et l'axe Rhin-Rhône. Enfin, les axes les plus disponibles en capacité sont l'arc Ouest, l'axe Nord – Est et l'axe Sud – Est.

L'arc méditerranéen est considéré à part. Une surévaluation par le modèle « MEDEE transport » des trafics liés à cet axe n'est pas exclue. Néanmoins, on peut noter que la mise en service prévue en 2017 (RFF)²⁰ du contournement Nîmes – Montpellier traduit un risque à moyen terme de saturation de la ligne.

Figure 29 : Estimation du taux d'utilisation du réseau ferré en 2010 selon le modèle « MEDEE-transport »



Plus en détails, le tableau suivant propose une lecture du taux d'utilisation en termes de trains par jour et par axe. Le réseau accepte par jour, pour le trafic fret et passagers grande ligne, une moyenne de 1600 trains selon la simulation. Seul 12% de ces derniers sont spécifiques au transport de marchandises. En valeur absolue, la circulation fret se concentre sur l'axe Nord et l'axe Paris – Lyon – Marseille, à l'image du transport passagers. En valeur relative, l'axe 7 s'affirme plus particulièrement que les autres dans le transport de marchandise. La faiblesse des liaisons voyageurs sur cet axe, l'héritage industriel des deux régions et la proximité du cœur industriel européen peuvent constituer des facteurs

²⁰ <http://contournement-nimes-montpellier.com/index.php>

explicatifs de cette surreprésentation. Mais hormis cet axe, le réseau ferré français en 2010 apparaît principalement dédié au transport de voyageur.

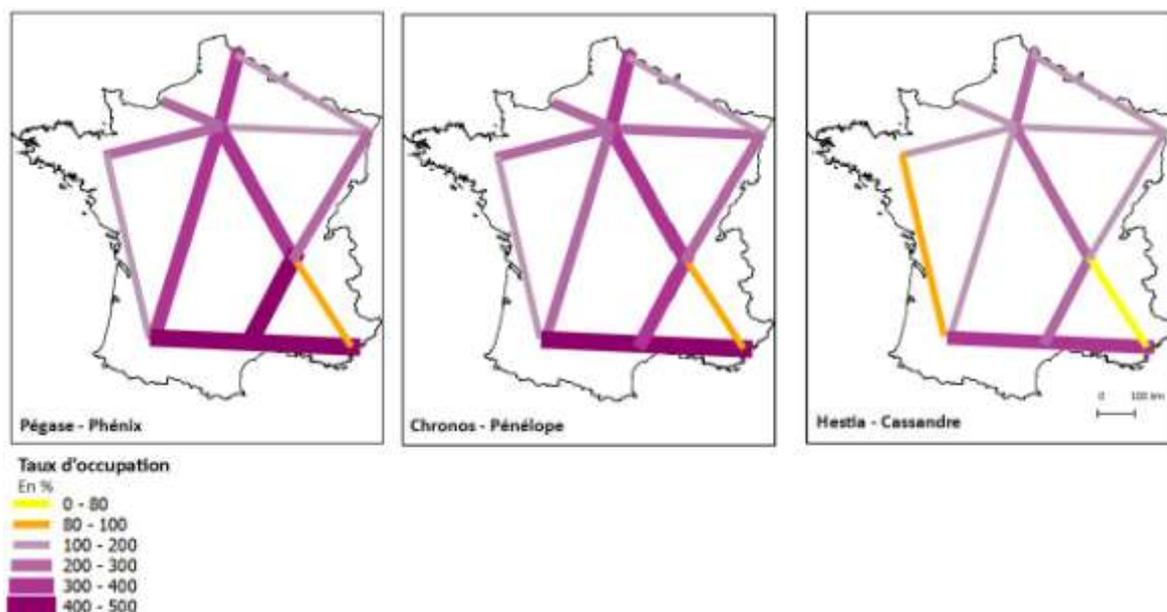
Figure 30 : Détail du nombre de trains/jour et par axe en 2010

	Fret	Passagers	Total	Fret/passagers
Axe 1	25	203	228	11 %
Axe 2	14	59	73	19 %
Axe 3	29	231	260	11 %
Axe 4	14	127	141	10 %
Axe 5	10	83	93	11 %
Axe 6	11	61	72	15 %
Axe 7	14	38	52	27 %
Axe 8	5	40	45	11 %
Axe 9	13	161	174	7 %
Axe 10	34	215	249	14 %
Axe 11	5	65	70	7 %
Axe 12	17	139	156	11 %
Total	191	1423	1614	12 %

Selon l'infrastructure et les conditions d'exploitations actuelles en 2050

A l'horizon 2050, le réseau ferré devrait être saturé quel que soit le scénario et aux conditions d'exploitation et d'infrastructure actuelles. La circulation du réseau devrait être en moyenne multipliée par 5 (1600 trains en 2010 à 8500 trains en 2050)

Figure 31 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite de « référence »



On observe une permanence dans le niveau d'utilisation des axes entre 2010 et 2050. L'arc méditerranéen et l'axe Lille – Paris – Lyon – Marseille conservent leur position structurante pour le transport de voyageurs. Les axes de la partie Est du réseau (2 et 7) et l'axe Seine ont un potentiel de spécialisation fret plus important. Cette surreprésentation s'explique en partie par la permanence industrielle de ces territoires et la proximité du port maritime du

Havre pour l'axe Seine. La moindre circulation de trains passagers sur ces axes comparativement aux axes structurants en valeur absolue peut également être un facteur explicatif.

Figure 32 : Détail du nombre de trains/jour et par axe en 2050 selon la simulation dite de « référence »

	Pégase			Chronos			Hestia		
	Fret	Passagers	Fret/passagers	Fret	Passagers	Fret/passagers	Fret	Passagers	Fret/passagers
Axe 1	62	1374	5%	219	1191	18%	120	815	15%
Axe 2	41	305	14%	168	278	60%	87	187	47%
Axe 3	74	1255	6%	280	1129	25%	154	762	20%
Axe 4	34	1002	3%	101	833	12%	55	570	10%
Axe 5	31	445	7%	126	407	31%	65	277	23%
Axe 6	40	324	12%	158	286	55%	79	190	42%
Axe 7	34	281	12%	132	236	56%	75	161	47%
Axe 8	18	230	8%	71	202	35%	36	136	26%
Axe 9	37	960	4%	147	838	18%	78	566	14%
Axe 10	72	1641	4%	212	1381	15%	121	953	13%
Axe 11	14	357	4%	58	321	18%	31	217	14%
Axe 12	31	948	3%	98	817	12%	58	559	10%
Total	489	9123	5%	1769	7918	22%	961	5393	18%

Ainsi, quel que soit le scénario, la croissance forte du trafic ferroviaire anticipée par l'ensemble des scénarios dépasse très largement les capacités du réseau ferré actuel. C'est pourquoi, à moins de remettre en cause les paradigmes économiques qui ont servi à constituer ces scénarios, il est nécessaire d'envisager un accroissement en capacité du réseau à moyen terme.

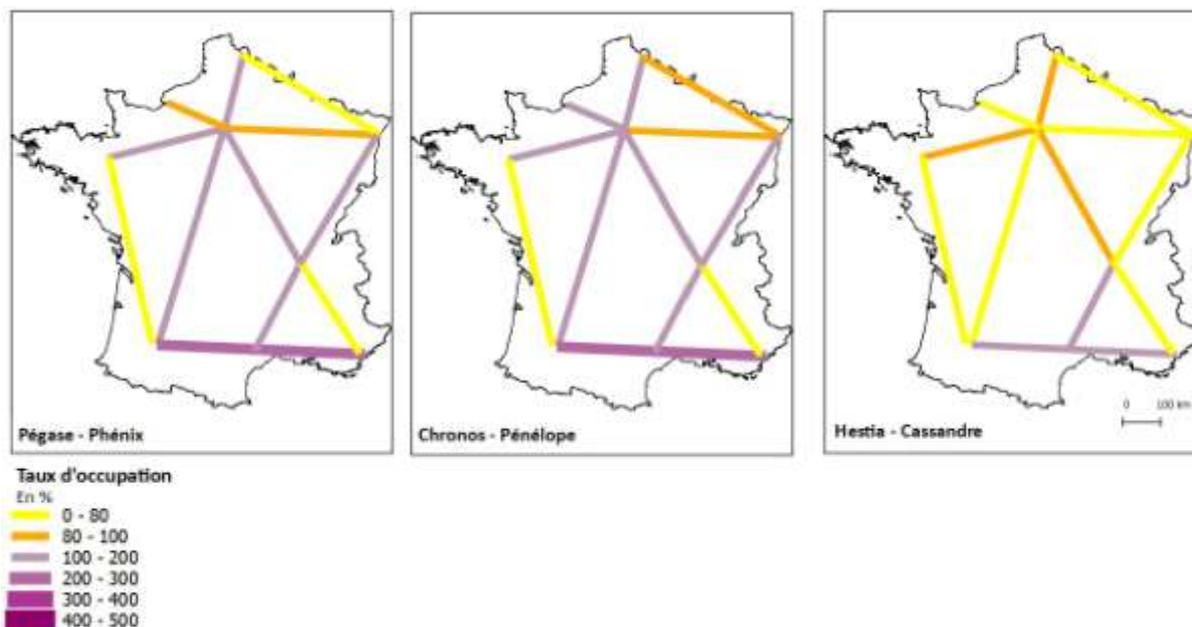
Dans l'hypothèse d'une évolution du matériel roulant (S2)

Cette simulation permet d'identifier l'impact du matériel roulant sur le niveau d'utilisation d'une infrastructure. Doubler la capacité d'emport permet de diviser d'autant le niveau de congestion sur le réseau. En filigrane, cette simulation révèle deux enjeux pour le réseau.

En premier lieu, le choix du matériel roulant peut être un facteur déterminant dans la gestion de la demande en heure de pointe. Pour autant, le doublement des convois peut entraîner à la marge un besoin d'adaptation de l'exploitation et de l'infrastructure. On considère dans cette simulation que ce besoin est couvert à l'horizon 2050 par les travaux de régénération.

En second lieu, un meilleur taux de remplissage moyen peut avoir un effet notable. Cette optimisation de la capacité du matériel disponible nécessite une meilleure régulation de la demande notamment en heure de pointe. L'envoi d'un « signal prix » fort en fonction du taux de congestion de l'infrastructure peut être une réponse à cette problématique.

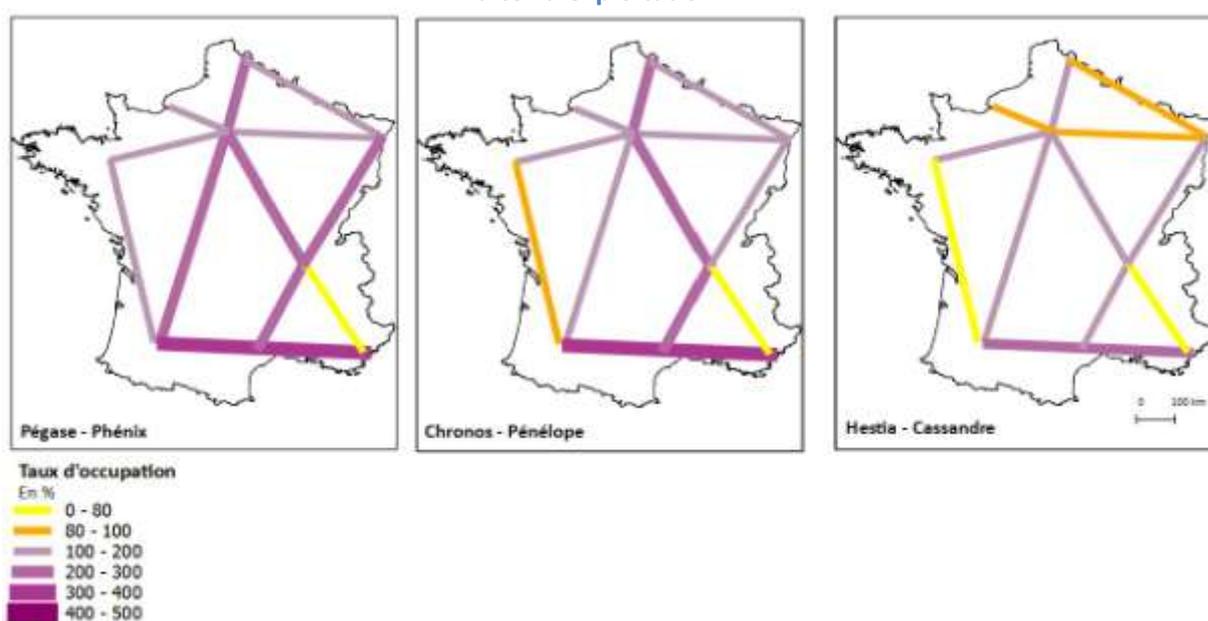
Figure 33 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "de matériel roulant"



Dans l'hypothèse d'une évolution des conditions d'exploitation (S3)

Changer les conditions d'exploitation permet un gain en capacité du réseau de 49% et divise son taux d'utilisation par 1,5. Cet effort peut avoir un réel impact à court terme sur l'ensemble du réseau et à moyen terme pour les axes les moins saturés. Cependant, la carte ci-dessous montre que si le taux d'utilisation est fortement réduit, le niveau de saturation sur les principaux axes reste important et très supérieur à la simulation S2.

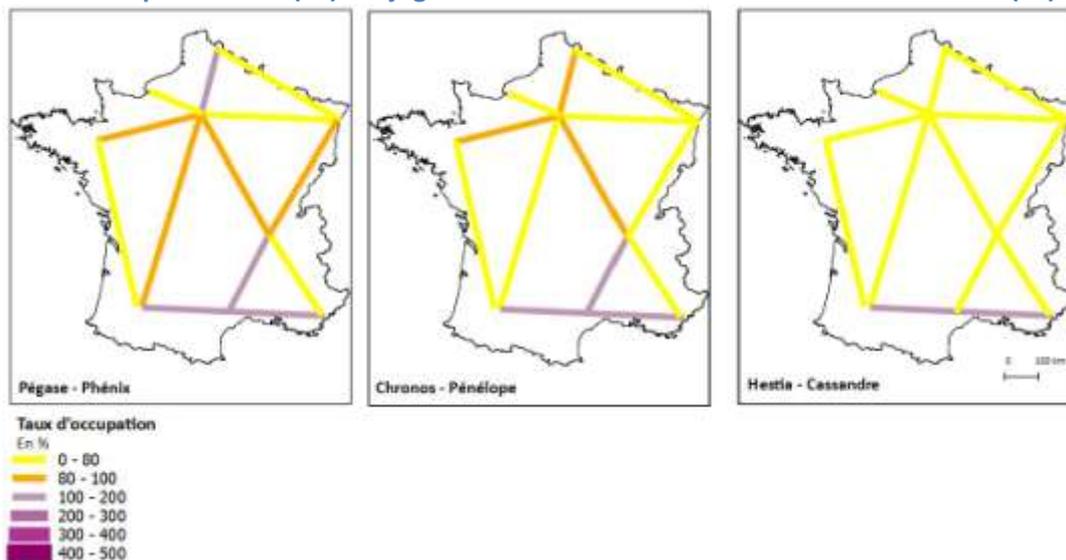
Figure 34 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite "d'exploitation »



Selon les projections suivantes, on peut noter que la combinaison d'une évolution du matériel roulant liée à l'exploitation permettrait de réduire par 3,5 le niveau de congestion à

l'horizon 2050. Cette simulation peut être estimée réaliste, la maximisation du gain en performance et capacité du matériel roulant dépendant en partie des règles d'exploitations. La rigidité des cantons est aujourd'hui la principale limite à l'augmentation des convois en nombre et en taille. La migration du réseau vers l'ERTMS niveau 2 devrait en partie résoudre ce problème. La dématérialisation des cantons et la meilleure connaissance des circulations en temps réel (information continue) devraient faciliter l'évolution en performance du matériel roulant.

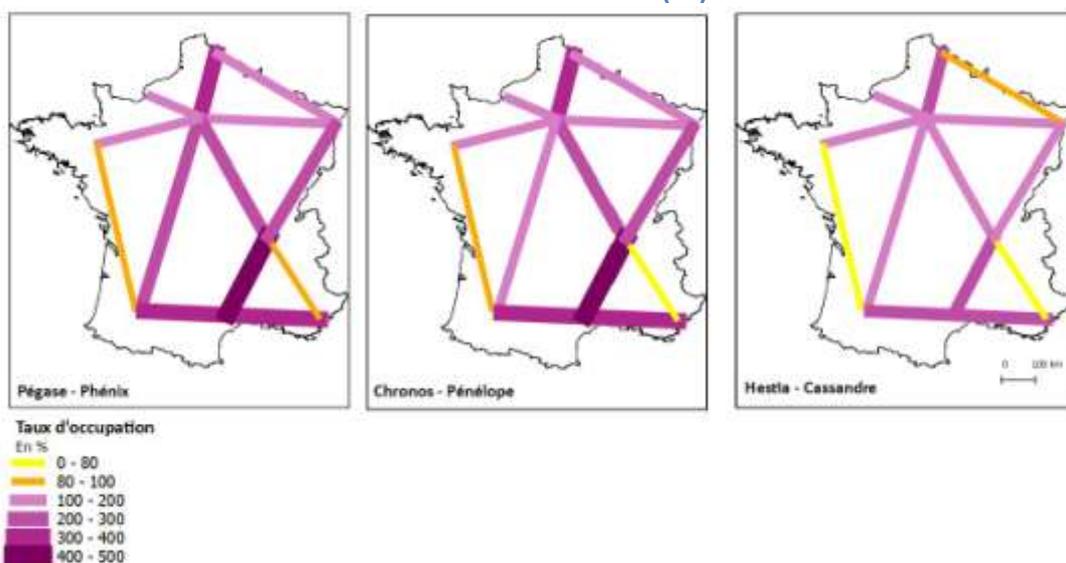
Figure 35 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite « d'exploitation » (S3) conjuguée à la simulation dite de « matériel roulant » (S2)



Dans l'hypothèse d'une évolution de l'infrastructure (S4)

Ce scénario offre un aperçu contradictoire. Le doublement du réseau sur certains axes permet un gain en capacité estimé à +58%. Cependant, la saturation du réseau reste une réalité sur les principaux axes. Son niveau est très supérieur aux résultats de la simulation « d'exploitation ».

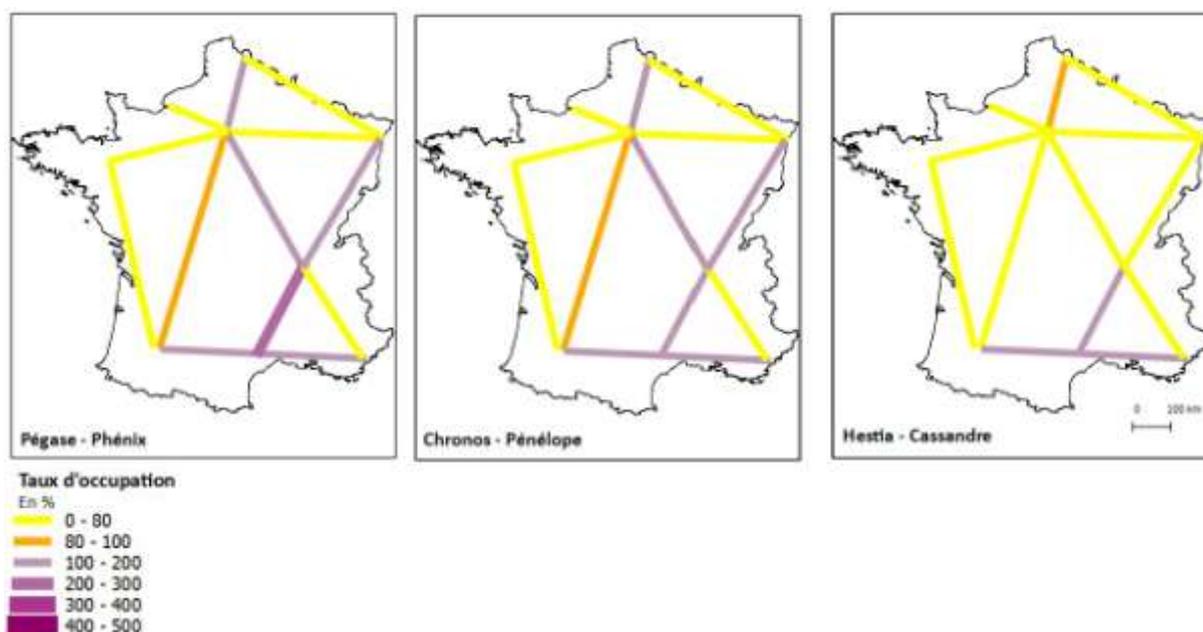
Figure 36 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite « d'infrastructure » (S4)



Ce contraste est saisissant et peut en partie s'expliquer par « l'effet réseau ». Dans la simulation 3, hypothèse est faite que les conditions d'exploitation auront changé sur l'ensemble du réseau d'ici 2050. A contrario, certains axes sont concernés à la marge par les projets du SNIT dans cette simulation. Il semblerait donc qu'une évolution globale du système ferroviaire en termes d'exploitation soit plus efficace par son effet réseau que des améliorations ponctuelles par axe. Ce phénomène a déjà pu être observé sur le réseau existant. Si la mise en service de la LGV Rhin-Rhône en 2011 a permis un gain en capacité sur l'axe, elle a aussi contribué à accroître les trafics sur les axes connexes et à renforcer la congestion sur le nœud ferroviaire parisien.

Néanmoins, l'extension du réseau conjugué à un accroissement en capacité et taux de remplissage du matériel roulant permet d'obtenir de meilleurs résultats. Pour autant, ils restent inférieurs aux projections liées à l'exploitation. On peut supposer que l'évolution de l'infrastructure permet de maximiser à la marge les performances du matériel roulant par rapport à l'exploitation. D'une part, le gain permis par l'accroissement en gabarit d'une ligne peut être annulé par la permanence de goulots sur d'autres points du réseau. D'autre part, la mise en service d'une ligne nouvelle n'est pas forcément corrélée à la définition de nouvelles règles d'exploitation.

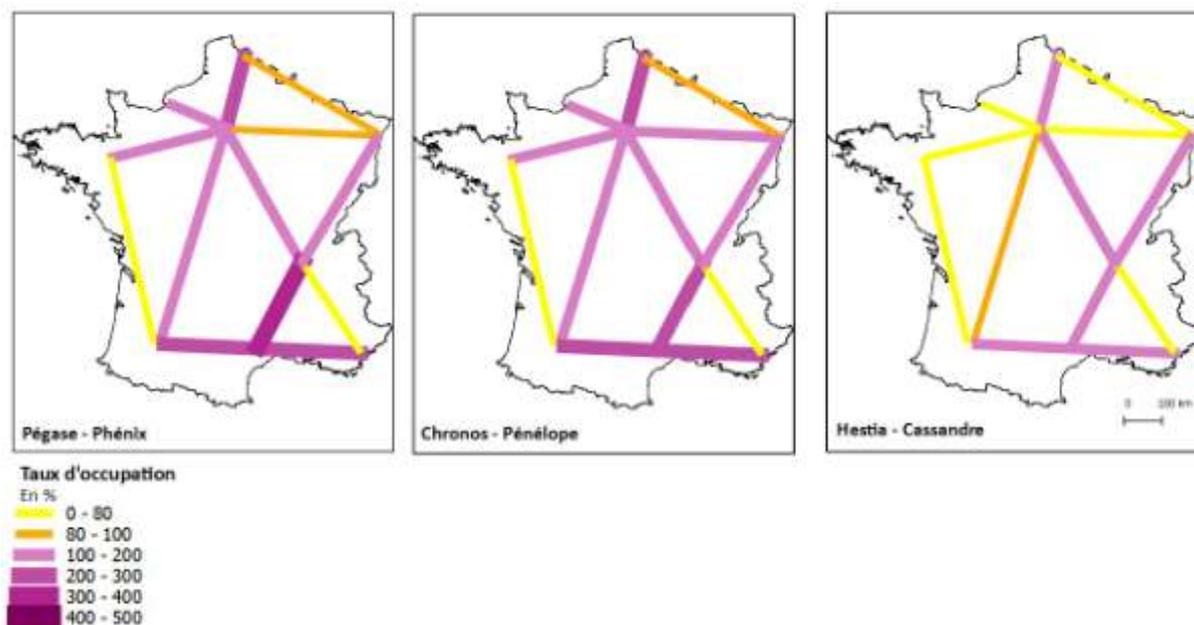
Figure 37 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite « d'infrastructure » (S4) conjuguée à la simulation dite de « matériel roulant » (S2)



Dans l'hypothèse d'une évolution de l'infrastructure et de l'exploitation (S5)

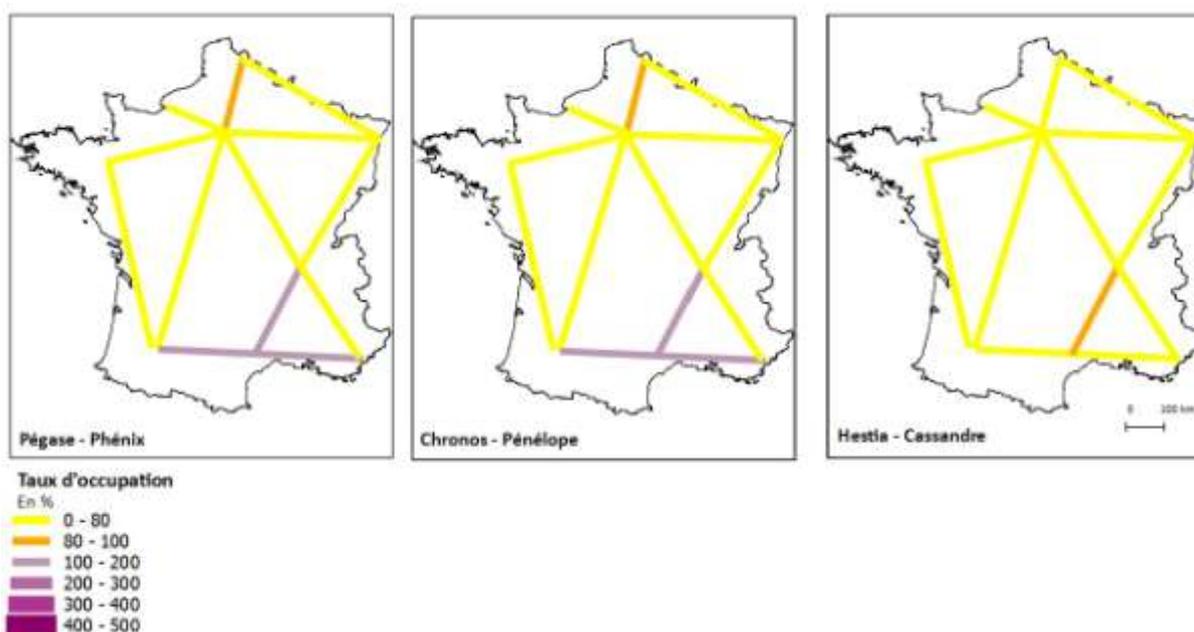
Une extension du réseau ferré fondée sur la réalisation du SNIT et un changement d'exploitation entraîne en gain en capacité de 131% et une réduction du taux d'occupation par 2. Le risque de saturation reste présent pour l'ensemble des axes et scénarios.

Figure 38 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite « d'infrastructure et d'exploitation » (S5)



L'effet conjugué des trois composantes du système ferroviaire à savoir, le matériel roulant et son optimisation, l'exploitation et l'infrastructure permet de diviser le taux de congestion par 4 à l'horizon 2050. Les deux premiers éléments permettent une optimisation générale du réseau tandis que l'extension de l'infrastructure apporte une solution efficace à des besoins en capacité ciblés du réseau. On considère donc, selon la simulation S6, que le problème de gestion du réseau ferroviaire devrait être résolu à l'horizon 2050.

Figure 39 : Estimation du taux d'occupation du réseau ferré à l'horizon 2050 selon la simulation dite « d'infrastructure et d'exploitation » (S5) conjuguée à la simulation S6



3.4 Conclusion : quels besoins en infrastructures ?

Le besoin en infrastructures varie fortement selon les modes de transport et les scénarios définis.

Le réseau routier, dans sa dimension nationale, semble avoir atteint son niveau de maturité. Les problèmes de congestion sont limités et devraient se réduire à l'horizon 2050 du fait du report modal massif des flux voyageurs vers le transport ferroviaire. Il faut alors changer de paradigmes pour considérer le réseau routier et se poser la question de sa conservation voire de sa reconversion en cas de baisse effective des trafics. Néanmoins, si l'automobile perd de sa compétitivité en termes de vitesse sur le ferroviaire pour les voyages longue distance, son taux d'utilisation pour les déplacements quotidiens et de proximité devrait rester élevé, voir s'accroître dans le cas du scénario Hestia. Nos conclusions pour le réseau national ne doivent donc pas être retenues pour les réseaux régionaux et locaux. Les investissements en capacité peuvent rester nécessaires pour certains nœuds urbains.

La problématique du besoin en infrastructure pour le transport ferroviaire est plus complexe. D'une part, le réseau continue d'évoluer rapidement et d'autre part, l'ensemble des scénarios s'accordent sur un accroissement fort des trafics à l'horizon 2050 alors même que certains axes ont déjà des taux d'utilisation élevés.

Plusieurs observations peuvent être formulées selon nos résultats.

En premier lieu, il est nécessaire de penser l'accroissement du réseau ferré. A conditions d'exploitation et d'infrastructure constantes, le réseau sera saturé en 2050 quel que soit le scénario.

En second lieu, l'effet conjugué d'une amélioration des conditions d'exploitation (migration vers l'ERTMS niveau 2) et d'une optimisation du matériel roulant (capacité et taux de remplissage) de limiter à moyen terme la saturation du réseau. Si ce gain reste insuffisant à l'horizon 2050 pour les scénarios Pégase et Chronos, il résout les problèmes de saturation dans le cas du scénario Hestia. Pour autant, on considère pour Hestia le réseau ferroviaire national et non régional qui, à l'image du réseau routier, pourrait se trouver saturé sur certains nœuds urbains.

En troisième lieu, une simple extension du réseau sans une évolution des règles d'exploitation ne compense pas les besoins en capacité exprimés par Pégase et Chronos. Un projet de la dimension du SNIT a donc un intérêt pour le réseau ferroviaire dans le sens où s'ensuivent sa rationalisation et sa modernisation. La séparation induite des flux sur les grandes lignes combinée à la migration du réseau vers le nouveau système de signalisation ERTMS devrait induire une plus grande homogénéité et souplesse des trafics. Ce sont ces conditions qui permettent d'apporter une réponse durable à l'accroissement prévu des flux et d'optimiser le matériel roulant.

Pour conclure l'étude, deux perspectives différentes semblent envisageables.

Le besoin en vitesse à l'horizon 2050 traduit par Pégase et Chronos s'exprime par un besoin en infrastructures nouvelles de taille nationale nécessaire pour assimiler l'accroissement anticipé de la mobilité interurbaine.

A contrario, la recherche d'un découplage entre croissance économique et besoin en vitesse se traduit dans Hestia par un besoin moindre en infrastructures d'ampleur nationale. L'exemple du ferroviaire montre qu'une simple évolution du mode d'exploitation du réseau liée à une optimisation du matériel roulant, sans infrastructure nouvelle, permet de résoudre l'ensemble des problèmes de saturation qui se poseraient sans changement. Pour autant, le besoin en investissement ne disparaîtrait pas. On peut penser qu'il y aurait un report vers le réseau régional, le développement des flux régionaux entraînant des risques de saturation des nœuds ferroviaires et routiers urbains.