CHAIRE ÉNERGIE & PROSPERITÉ
Financement et évaluations de la transition énergétique

Comment atteindre le facteur 4 dans les transports ?

Analyse comparée de scénarios de prospectives à 2050

Aurélien BIGO

05/09/2016

Remerciements

Ce rapport correspond au mémoire que j'ai soutenu dans le cadre du master 2 d'Economie du développement durable, de l'environnement et de l'énergie (EDDEE), parcours Environnement.

Il fait suite au stage de fin d'études réalisé en recherche sur la transition énergétique dans les transports. Le stage est le résultat d'un partenariat entre la SNCF, organisme d'accueil, et Polytechnique, qui a réalisé le suivi pédagogique, dans le cadre de la Chaire Energie et Prospérité. Le suivi administratif a été réalisé avec l'Université de Nanterre.

Je tiens à remercier tout particulièrement la SNCF et la direction de la Stratégie & Finances pour leur accueil et les échanges qui ont été possibles tout au long de ce travail. Je remercie également Polytechnique et la Chaire Energie et Prospérité notamment Patricia Crifo, Guy Meunier et Jean-Pierre Ponssard. Enfin je tiens à remercier les personnes que j'ai pu rencontrer et m'ont ainsi apporté de précieux conseils et informations dans la construction de ce rapport, je citerai entre autres le Forum Vies Mobiles, Stéphane Chatelin de négaWatt, l'ADEME, le CGDD, le Shift Project, ainsi que Vincent Kaufmann.

Cette publication n'engage bien évidemment que son auteur et ne reflète aucunement des prises de position de personnes rencontrées.

Table des matières

REMERCIEMENTS 3

TABLE DES MATIERES 5

TABLE DES FIGURES 9

TABLE DES TABLEAUX 11

EXECUTIVE SUMMARY 12

CONTEXTE ET METHODOLOGIE 12

RESULTATS DE LA COMPARAISON DES SCENARIOS 13

LES MESURES PERMETTANT D'ATTEINDRE LE FACTEUR 4 14

LES AVANTAGES DE LA TRANSITION DANS LES TRANSPORTS 15

PERSPECTIVES D'ETUDES 16

AVANT-PROPOS 17

OBJET ET PERIMETRE DE L'ETUDE 17

PROBLEMATIQUES ET APPORTS DE L'ETUDE 17

PLAN DU RAPPORT 18

1. LES DEFIS DE LA MOBILITE AUJOURD'HUI ET DEMAIN 19

1.1. SATISFAIRE A LA DEMANDE DE TRANSPORT 19

1.1.1. Etat des lieux et évolution des comportements de mobilité des Français 19

1.1.1.1. Une mobilité globale toujours en augmentation 19

1.1.1.2. Les critères de différenciation des usagers 20

1.1.1.3. Une place prédominante de la voiture peu à peu remise en cause 21

1.1.2. Le transport de marchandises également dominé par le mode routier 22

1.2. REDUIRE LES EXTERNALITES NEGATIVES, PROMOUVOIR LES EXTERNALITES POSITIVES 23

1.2.1. Changement climatique : développer une mobilité sobre en CO_2 23

1.2.1.1. Un défi majeur du siècle à venir 23

1.2.1.2. Les émissions du secteur des transports 26

1.2.1.3. Le facteur 4 et autres objectifs de la politique française 28

1.2.2. Ressources : sortir de la dépendance au pétrole et autres ressources épuisables 30

1.2.2.1. Différentes familles de contraintes sur l'énergie 30

1.2.2.2. L'important rôle historique de l'énergie 31

1.2.2.3. L'économie dépendante de l'énergie 32

1.2.2.4. Les transports largement dépendants du pétrole 36

1.2.3. Les autres externalités des transports 37

1.2.3.1. Les externalités environnementales 38

1.2.3.2. Les externalités sociales 40

1.2.3.3. Les externalités économiques 40

2. LES SCENARIOS DE PROSPECTIVE SUR LE FACTEUR 4 DANS LES TRANSPORTS....41

2.1. OBJECTIFS ET METHODOLOGIE DE LA COMPARAISON DES SCENARIOS 41

2.1.1. Des scénarios aux logiques très variées 43

2.1.1.1. Les modèles économiques et techniques 43

2.1.1.2. Scénarios exploratoires et normatifs 43

2.1.1.3. Scénarios tendanciels et volontaristes 44

2.1.1.4. Les paramètres clés différenciant les scénarios 44

2.1.2. Les périmètres des scénarios 45

2.1.2.1. Le périmètre sectoriel des études 45

2.1.2.2. Les périmètres géographiques et temporels 46

2.1.2.3. Les sources statistiques pour le paramétrage du modèle 47

2.1.3. Les unités utilisées 47

2.2. PRESENTATION ET TYPOLOGIE DES SCENARIOS 48

2.2.1. La classification utilisée 48

2.2.2. Présentation des scénarios et plan des fiches en annexe 51

2.2.2.1. Les scénarios tendanciels 51

2.2.2.2. Les scénarios volontaristes 53

2.3. LES PRINCIPAUX RESULTATS DES SCENARIOS 59

2.3.1. Les évolutions des principaux paramètres dans les scénarios 59

2.3.2. Seule la moitié des scénarios volontaristes atteignent la contribution au facteur 4 65

2.3.2.1. Le tableau et les figures ci-dessus illustrent la difficulté à atteindre le facteur 4 65

2.3.2.2. Le transport des voyageurs plus facile à décarboner que le transport de marchandises 65

2.3.2.3. Le progrès technique seul ne peut permettre qu'un facteur 2 au mieux 66

2.3.2.4. Une combinaison des leviers politiques, technologiques et comportementaux est nécessaire pour atteindre le facteur 4 66

3. LES MESURES PERMETTANT D'ATTEINDRE LE FACTEUR 4....67

3.1. LES MESURES ET EVOLUTIONS NECESSAIRES DANS LES TRANSPORTS 67

3.1.1. Limiter : une nécessaire modération des déplacements 69

3.1.1.1. Urbanisme et organisation du territoire 69

3.1.1.2. Le télétravail 70

3.1.1.3. Livraisons à domicile, consommation locale, incitations à la sobriété 71

3.1.2. Choix modal : des reports modaux importants indispensables 72

3.1.2.1. La tarification et la fiscalité carbone 72

3.1.2.2. Le développement des infrastructures et des services 75

3.1.2.3. L'information du public et les changements de comportement 78

3.1.3. Partage et taux de remplissage des véhicules : ils doivent poursuivre leur forte progression 79

3.1.3.1. Le covoiturage 79

3.1.3.2. Le taux de remplissage du transport de marchandises 81

3.1.3.3. L'autopartage et les services de mobilité 81

3.1.4. Efficacité énergétique : des progrès à continuer 83

3.1.4.1. Les réductions de consommations unitaires 83

3.1.4.2. Sobriété et modération dans l'usage des véhicules 84

3.1.5. Choix des carburants : le besoin de diversification des sources d'énergie 86

3.1.5.1. Développement des véhicules électriques 87

3.1.5.2. Développement du gaz 90

3.1.5.3. Développement des biocarburants 91

3.1.5.4. Développement de l'hydrogène 91

3.2. APPLICATION A UN MODELE DE REPARTITION RER - VOITURE 92
3.2.1. Description du modèle 92
3.2.1.1. Contexte et objectifs du modèle 92
3.2.1.2. Principales spécifications et équations du modèle 92
3.2.1.3. Equilibre individuel pour les usagers 93
3.2.1.4. Optimum social 94
3.2.1.5. Subvention du RER 94
3.2.1.6. Introduction d'une externalité de pollution P 95
3.2.1.7. Ajout d'une taxe sur la voiture 95
3.2.1.8. Politique publique à budget contraint 95
3.2.2. Application numérique 96
3.2.2.1. Equilibre pour les usagers 97
3.2.2.2. Optimum social avec congestion 97
3.2.2.3. Subvention du RER 97
3.2.2.4. Introduction d'une externalité de pollution P 98
3.2.2.5. Ajout d'une taxe sur la voiture, et budget contraint 98
3.2.3. Evolutions supplémentaires dans les transports 99
3.2.3.1. Hypothèses sur le chiffrage des émissions de CO_2 99
3.2.3.2. Les mesures et évolutions testées 99
3.2.4. Discussion et perspectives du modèle 103
3.2.4.1. Apports du modèle et des résultats 103
3.2.4.2. Limites et perspectives d'étude 104

4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES 105
4.1. CONCLUSIONS SUR LA COMPARAISON DES SCENARIOS 105
4.2. DISCUSSION SUR LES HYPOTHESES DES MODELES 107
4.2.1. Hypothèses exogènes et hypothèses endogènes 107
4.2.2. Des hypothèses à expliquer 109
4.2.3. Le réalisme et l'acceptabilité des mesures peu discutés 110
4.3. PRECONISATIONS POUR LES ETUDES PROSPECTIVES 111

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 112

SIGLES ET ABREVIATIONS 122
INSTITUTS CITES 122
SIGLES ET ABREVIATIONS UTILISES 123

ANNEXE : LES FICHES-RESUMEES DES SCENARIOS ETUDIES 125
CGDD 2016 : la demande de transport sur le long terme 125
DGEC 2014-15 : scénarios prospectifs Energie-Climat-Air à l'horizon 2035 127
SNCF 2015 : vers une mobilité sobre en CO_2 130
Voyages SNCF 2015 : étude prospective 2050 mobilité longue distance 134
Négatep 2014 : diviser par quatre les rejets de CO_2 dus à l'énergie 135
NégaWatt 2011 : sobriété, efficacité, et renouvelable 137
ADEME 2012 : visions 2030 et 2050 141
ANCRE 2013 : scénarios pour la transition énergétique 144
GrDF 2013 : scénario facteur 4 147
Greenpeace 2013 : scénario de transition énergétique 149

CIRED-RAC 2012 : scénario bas carbone « acceptable »..... 150
Enerdata – LET, 2008 : les scénarios de mobilité durable du PREDIT 154
CGPC 2006 : démarche prospective transports 2050..... 158

Table des figures

Figure 1 : Transport interieur de voyageurs en France en 2014, en Mds v-km (d'apres donnees CGDD, 2015) 19
Figure 2 : Evolution de la part de marche de la voiture dans les grandes agglomerations françaises (Certu, 2012 ; d'apres EMD standard Certu) 21
Figure 3 : Repartition modale des transports terrestres de marchandises en France, hors oleoducs. Total : 328,5 Mds t-km (d'apres donnees CGDD, 2015) 22
Figure 4 : Transport interieur terrestre par type de marchandises et mode, en Mds t-km (CGDD, 2015) 22
Figure 5 : Repartition mondiale des emissions de gaz a effet de serre par secteur en 2010 (MEDDE, 2015a) 23
Figure 6 : Repartition des emissions de CO_2 des transports par mode au niveau mondial (en 2010 ; IPCC, 2014c), dans l'Union Europeenne (en 2014 ; European Commission, 2016) et en France (en 2013 ; MEDDE, 2015a) 26
Figure 7 : Emissions de CO_2 par voyageur.kilometre en France pour les modes de transports ferroviaires, le bus, les voitures particulieres (VP) et l'avion, pour differents types de distance (d'apres donnees ADEME, 2016a) 27
Figure 8 : Repartition sectorielle indicative des premiers budgets carbones dans la SNBC (MEDDE, 2015c) 29
Figure 9 : Croissance annuelle du PIB et de la consommation mondiale d'energie entre 1965 et 2015 (BP, 2016a) .. 32
Figure 10 : Schema de l'interdependance entre la croissance economique, la consommation de petrole et son prix, avant les chocs petroliers (a gauche) et aujourd'hui (a droite ; repris d'apres Avenir sans petrole, 2014) 34
Figure 11 : CAPEX (depenses d'investissement) en exploration & production par baril entre 1985 et 2013 (Our Finite World, 2015b) 35
Figure 12 : Criteres utilises pour la classification des scenarios etudies 48
Figure 13 : Classification utilisee pour les 29 scenarios etudies, selon qu'ils sont tendanciels ou volontaristes, que les evolutions sont endogenes ou exogenes aux transports et selon les principaux leviers utilises 49
Figure 14 : Evolution cumulee des principaux parametres pour le transport, dans les principaux scenarios etudies. Classement par scenario. 61
Figure 15 : Evolutions cumulees des principaux parametres pour les scenarios etudies. Classement par parametre. . 62
Figure 16 : Evolutions annuelles (TCAM sur la periode) des principaux parametres pour les scenarios etudies. Classement par parametre 63
Figure 17 : Evolution des principaux parametres pour le transport de voyageurs, dans les scenarios etudies 64
Figure 18 : Variables, mesures et impacts de la transition energetique dans les transports (Carbone 4, 2014) 67
Figure 19 : Facteurs structurant les emissions des transports (MEDDE, 2015c) 68
Figure 20 : Demande de mobilite et parts modales des differents moyens de transport de voyageurs dans les scenarios ou les donnees etaient disponibles 73
Figure 21 : Demande de transport de marchandises et parts modales dans les scenarios ou les donnees etaient disponibles 74
Figure 22 : La complementarite des offres d'autopartage avec les autres offres de transport (ADEME, 2015b) 82
Figure 23 : Evolution de la puissance, du poids et du prix du vehicule particulier de 1953 a 2011 en France (Meilhan, 2016) 84
Figure 24 : Emissions totales de CO_2 en fonction du poids, pour un vehicule electrique (mix France 2010) et un vehicule thermique (David, 2012) 84
Figure 25 : Consommation en litres par 100 kilometres suivant la vitesse en kilometre par heure (INSEE, 2016c) 85
Figure 26 : Consommation energetique finale des transports en 2050 et repartition par energie dans les scenarios ou les donnees sont disponibles 86
Figure 27 : Les six impacts potentiels retenus pour la VP en France en 2012 (ADEME, 2013b) 87
Figure 28 : Potentiel de changement climatique pour les vehicules electriques français et allemand et les vehicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scenario de reference (ADEME, 2013b) 88
Figure 29 : Pertinence economique du vehicule electrique en fonction de son usage quotidien/annuel (ADEME, 2016b) 89
Figure 30 : Cout du RER et de la voiture pour les usagers selon la proportion d'usagers qui prennent le RER 96

FIGURE 31 : MONTANT DES EXTERNALITES DU RER, DE LA VOITURE, ET LES EXTERNALITES TOTALES, EN FONCTION DE LA PROPORTION D'USAGERS QUI PREND LE RER 98
FIGURE 32 : TAUX DE CROISSANCE REELS DE LA FRANCE ENTRE 1950 ET 2015 (INSEE, 2016B) ET PREVISIONS DE CROISSANCE D'ICI 2050 DE 4 SCENARIOS ETUDIES 107
FIGURE 33 : EMISSIONS DE CO_2 (EN MTCO_2) DU TRANSPORT DE VOYAGEURS ET DE MARCHANDISES DANS LES SCENARIOS TENDANCIEL (A GAUCHE) ET SNBC (A DROITE) 126
FIGURE 34 : PROJECTIONS DE LA DEMANDE FINALE D'ENERGIE PAR SECTEUR ET PAR SCENARIO (FORMAT SOES ; SOURCE ENERDATA DANS DGEC, 2015) 128
FIGURE 35 : ECART DE PIB ENTRE AMS2 ET AME DANS NEMESIS (SOURCE SEURECO-ERASME, DANS DGEC, 2015) 129
FIGURE 36 : TYPOLOGIE DE CHOIX MODAL (D'APRES ENQUETE SNCF, 2016) 130
FIGURE 37 : TRAFICS ET PARTS MODALES EN 2013 ET DANS LES 3 SCENARIOS (REPRIS D'APRES DONNEES SNCF, 2015A) 132
FIGURE 38 : EMISSIONS DE CO_2 DES TRANSPORTS DANS LES 3 SCENARIOS (SNCF, 2015A) 132
FIGURE 39 : BILAN DES EXTERNALITES POSITIVES ET NEGATIVES (A GAUCHE) ET DETAIL DES EXTERNALITES NEGATIVES (A DROITE) POUR CHAQUE SCENARIO (SNCF, 2015A) 133
FIGURE 40 : L'APPROCHE GLOBALE NEGATEP (SAUVONS LE CLIMAT, 2014) 135
FIGURE 41 : REPARTITION DES POSTES DE DEPENSES CUMULEES (INVESTISSEMENT ET FONCTIONNEMENT) EVALUEES, SUR UNE PERIODE DE 40 ANS, SELON 3 HORIZONS DIFFERENTS, EN MDS € (SAUVONS LE CLIMAT, 2014) 136
FIGURE 42 : PRIORITES DE LA DEMARCHE NEGAWATT 137
FIGURE 43 : MOBILITE DES PERSONNES ENTRE 2008 ET 2010 (D'APRES DONNEES NEGAWATT, 2014) 138
FIGURE 44 : DIAGRAMME DE SANKEY POUR LA FRANCE, EN 2010 (NEGAWATT, 2014) 139
FIGURE 45 : DIAGRAMME DE SANKEY POUR LA FRANCE, EN 2050, DANS LE SCENARIO NEGAWATT (NEGAWATT, 2014) 139
FIGURE 46 : CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES TRANSPORTS DE VOYAGEURS (A GAUCHE) ET DE MARCHANDISES (A DROITE) DE 2000 A 2050 140
FIGURE 47 : REPARTITION DES FLUX DE VOYAGEURS DANS LES TERRITOIRES URBAINS, PERIURBAINS ET EN LONGUE DISTANCE (D'APRES DONNEES ADEME, 2013C) 142
FIGURE 48 : CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DES TRANSPORTS PAR SOURCE (SUR DONNEES ADEME, 2013C ET ADEME, 2012 POUR REPARTITION ESSENCE/DIESEL) 142
FIGURE 49 : EVOLUTION DE LA DEMANDE DE MOBILITE SELON LES SCENARIOS (ANCRE, 2014) 145
FIGURE 50 : CONSOMMATION DES TRANSPORTS PAR ENERGIE DANS LES DIFFERENTS SCENARIOS (ANCRE, 2014) 145
FIGURE 51 : CONSOMMATIONS FINALES DES VECTEURS ENERGETIQUES EN 2050, TOUS SECTEURS CONFONDUS (GRDF, 2013A) .. 148
FIGURE 52 : CONTENUS EN ENERGIE RENOUVELABLE DES VECTEURS EN 2050, TOUS SECTEURS CONFONDUS (GRDF, 2013A) 148
FIGURE 53 : PART DE LA CONSOMMATION FINALE D'ELECTRICITE POUR LES TRANSPORTS DANS LE SCENARIO DE TRANSITION ENERGETIQUE (GREENPEACE, 2013) 149
FIGURE 54 : TRAFICS PASSAGERS ET MARCHANDISES EN 2050 (REPRIS D'APRES LET&ENERDATA, 2008 ET LOPEZ-RUIZ, 2009) ... 155
FIGURE 55 : EMISSIONS DIRECTES DE CO_2 DES TRANSPORTS DE VOYAGEURS ET DE MARCHANDISES SELON LES SCENARIOS, AVEC DES HYPOTHESES OPTIMISTES SUR LE DEVELOPPEMENT DES VEHICULES HYBRIDES (LET&ENERDATA, 2008) 156
FIGURE 56 : ANALYSE DE SENSIBILITE DES POLITIQUES PUBLIQUES SELON LES SCENARIOS, HORS PROGRES TECHNOLOGIQUES SUR LES MOTEURS QUI REPRESENTENT 55% DES REDUCTIONS (D'APRES LOPEZ-RUIZ ET CROZET, 2010 ET 2011) 157
FIGURE 57 : HYPOTHESES CLES DES SCENARIOS (CGPC, 2006B) 159

Table des tableaux

TABLEAU 1 : BILAN DES EXTERNALITES ET DES PRELEVEMENTS POUR LE TRANSPORT URBAIN (EN C€/V-KM ; CGDD, 2013A) 37
TABLEAU 2 : LISTE ET PERIMETRE DES 13 PUBLICATIONS ET 29 SCENARIOS ETUDIES 42
TABLEAU 3 : CLASSIFICATION DES SCENARIOS SELON LEUR VOLONTARISME SUR LA TRANSITION ENERGETIQUE DANS LES TRANSPORTS, LE CARACTERE ENDOGENE OU EXOGENE AU SYSTEME DE TRANSPORTS DES PRINCIPALES HYPOTHESES, ET LES LEVIERS UTILISES. .....
TABLEAU 4 : EVOLUTION CUMULEE (EN %) DES PRINCIPAUX PARAMETRES DES SCENARIOS ETUDIES, ENTRE L'ANNEE DE REFERENCE ET L'HORIZON 60
TABLEAU 5 : VALEUR DES PARAMETRES DES FONCTIONS DE COUT DES TRANSPORTS DANS L'APPLICATION NUMERIQUE 96
TABLEAU 6 : IMPACT DES 6 EVOLUTIONS TESTEES SUR LES PARTS MODALES, LES EMISSIONS DE CO_2 ET LA FISCALITE (LES PARAMETRES EN GRIS SONT LES PARAMETRES MODIFIES D'UNE EVOLUTION A L'AUTRE) 101
TABLEAU 7 : PRINCIPAUX DETERMINANTS DE LA MOBILITE DANS LES TROIS SCENARIOS 2050 (RESUME D'APRES SNCF, 2015A).... 131
TABLEAU 8 : PRINCIPAUX RESULTATS DES SCENARIOS CONCERNANT LA MOBILITE LONGUE DISTANCE (SNCF, 2015B) 134
TABLEAU 9 : MESURES POLITIQUES ACCEPTABLES DANS LES TRANSPORTS POUR LE SCENARIO BAS-CARBONE « ACCEPTABLE » (CIRED-RAC, 2012) .....
TABLEAU 10 : COUTS DES INVESTISSEMENTS ET DES POLITIQUES DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS (CIRED-RAC, 2012) 152

Executive Summary

Analyse comparée de scénarios de prospective à 2050

Contexte et méthodologie

La limitation du réchauffement climatique à 2°C nécessite que les émissions mondiales soient divisées par 2 d'ici 2050, et par 4 ou 5 pour les pays développés. La France s'est donc dotée dès 2005 de **l'objectif de Facteur 4**, fixant une baisse des émissions de gaz à effet de serre de 75% entre 1990 et 2050. En 2015, la stratégie nationale bas-carbone décline cet objectif par secteurs et vise une **réduction des émissions des transports d'au moins 70% entre 2013 et 2050**.

L'économie est très dépendante du pétrole, comme l'a montré l'impact de la hausse du prix du pétrole sur le déclenchement de la crise de 2007-2008. Ainsi, la croissance économique est fortement corrélée à la croissance de la quantité d'énergie consommée, et à la croissance des **transports**, qui sont **dépendants du pétrole à 91,4% en France**. L'épuisement progressif des réserves non renouvelables de pétrole fournit une deuxième raison à la sortie des transports de leur dépendance au pétrole.

La **comparaison des 27 scénarios de prospective à 2050** (et 2 scénarios à 2035) provenant de 13 publications, permet de dresser un panorama des évolutions possibles pour diminuer d'au moins 70% les émissions des transports entre 2013 et 2050. Les publications étudiées proviennent de rapports d'instituts publics, de recherche et d'associations.

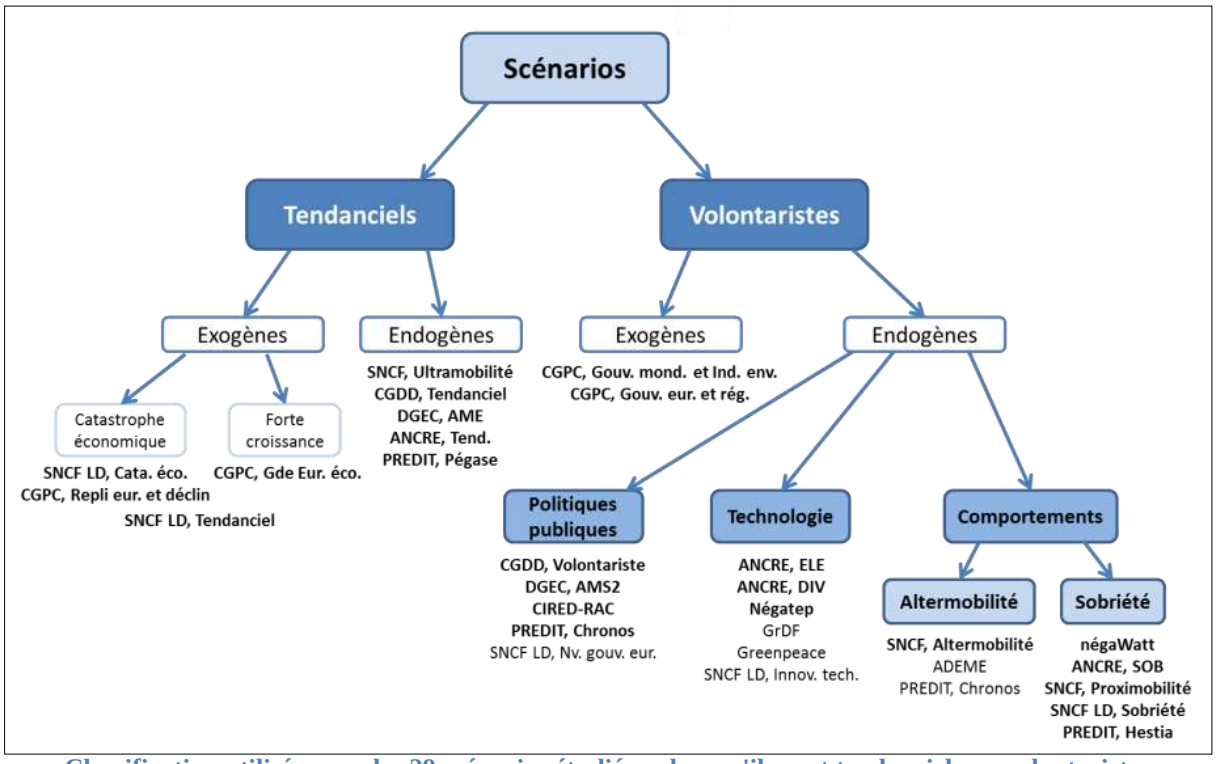
Comparaison de
13 PUBLICATIONS
29 SCENARIOS

La méthodologie a consisté à **confronter les hypothèses, mesures et résultats** des différents scénarios. Les précautions à prendre pour la comparaison directe des chiffres ont été précisées, étant donné les différences de périmètres sectoriel, temporel, voire géographique entre les scénarios.

Résultats de la comparaison des scénarios

La **typologie des scénarios** réalisée différencie les scénarios selon qu'ils sont tendanciels ou volontaristes sur la transition énergétique dans les transports, puis selon que les principaux paramètres et hypothèses du modèle sont endogènes ou exogènes aux transports. Quatre catégories apparaissent donc, avec 4 scénarios tendanciels dits exogènes, 4 scénarios tendanciels endogènes, 2 scénarios volontaristes exogènes, et enfin 17 scénarios volontaristes endogènes.

Cette dernière catégorie constitue la plus intéressante dans le cadre de cette étude. Ainsi ces 17 scénarios ont été différenciés selon le type de leviers privilégiés pour obtenir les baisses d'émissions, à savoir les évolutions des **politiques publiques**, de la **technologie** et des **comportements** de mobilité.



Classification utilisée pour les 29 scénarios étudiés, selon qu'ils sont tendanciels ou volontaristes, que les évolutions sont endogènes ou exogènes aux transports, et selon les principaux leviers utilisés

Il apparait que tous les **scénarios tendanciels**, qui reposent essentiellement sur les évolutions techniques, ne permettent au mieux que l'atteinte d'un facteur 2, même avec des hypothèses optimistes. Des évolutions plus volontaristes sur les politiques publiques et les changements de comportement sont donc nécessaires à l'atteinte du facteur 4.

LA TECHNOLOGIE SEULE NE PERMET PAS D'ATTEINDRE L'OBJECTIF DE FACTEUR 4

Sur les 19 scénarios volontaristes, **environ la moitié des scénarios permettent** d'**atteindre la contribution au Facteur 4** : les 3 scénarios de négaWatt, l'ADEME et Greenpeace permettent de dépasser largement le facteur 4 avec des baisses des émissions d'environ 93% ; 6 autres scénarios permettent d'atteindre une baisse de 70% ; 2 autres l'atteignent seulement sous certaines variantes du scénario ; et 8 scénarios ne l'atteignent pas (parmi lesquels 3 scénarios ne concernent que le transport longue distance).

Besoin de combiner les leviers
POLITIQUES
TECHNOLOGIQUES
COMPORTEMENTAUX

L'analyse ne montre pas de fortes différences de résultats suivant que les scénarios s'appuient plutôt sur le levier politique, technologique, ou comportemental. C'est surtout la combinaison de ces leviers et des types d'actions engagées qui permet d'obtenir des résultats en accord avec l'objectif de facteur 4.

Par ailleurs, les scénarios mettent en évidence la plus difficile décarbonation du **transport de marchandises** comparé au transport de voyageurs. Cela peut s'expliquer par une demande plus fortement croissante, des reports modaux et un passage à des motorisations électriques plus difficiles.

Les mesures permettant d'atteindre le facteur 4

Les mesures et évolutions permettant d'atteindre le facteur 4 ont été classées en **5 catégories**, sur lesquelles des points de convergence et de divergence apparaissent entre les scénarios :

1) Limitation de la demande de transport

Alors que les scénarios s'accordent en général sur le développement du **télétravail**, l'importance donnée à la **réorganisation du territoire** est variable tandis que peu de scénarios tablent sur une **relocalisation des activités** économiques et des modes de vie. En conséquence, l'évolution de la demande de transport est très variable selon les scénarios, avec des croissances en général plus élevées pour le transport de marchandises.

2) Choix modal

Les scénarios volontaristes s'accordent sur l'importance de **réduire la place du mode routier**, bien qu'il reste majoritaire dans l'ensemble des scénarios. Ainsi, la part de la voiture baisse au profit des transports en commun et des modes actifs (marche et vélo) pour le transport de voyageurs. De même, une partie du trafic routier de marchandises est transféré vers les modes ferroviaires et fluviaux. Ces modifications demandent de forts investissements en **infrastructures**, des évolutions de la **fiscalité** en faveur des modes les moins polluants (taxe carbone, redevance poids-lourds, etc.), et des incitations aux **comportements** vertueux des usagers. Par ailleurs, la place de l'avion est controversée, et nécessite des actions des pouvoirs publics notamment sur la fiscalité, afin d'éviter une forte croissance du trafic à l'avenir.

3) Partage et taux de remplissage des véhicules

Les scénarios s'accordent sur le besoin de poursuivre le développement actuel du **covoiturage**. L'**autopartage**, les véhicules serviciels ou les minibus sont également fortement développés dans les scénarios les plus volontaristes. Des progrès sur les taux de remplissage du transport de marchandises sont également prévus, parfois encouragés par une redevance poids-lourds.

4) Efficacité énergétique

Les **progrès techniques** sur les moteurs se poursuivent dans l'ensemble des scénarios, avec l'aide du développement des véhicules hybrides dans une majorité d'entre eux. Mais les gains d'efficacité énergétique proviennent aussi plus rarement d'usages plus sobres des véhicules, en particulier via le développement des **petits véhicules** urbains, la baisse de la **vitesse** sur les routes ou l'**écoconduite**.

5) Choix des carburants

C'est assurément le point le plus divergent des scénarios. Les paris sur les technologies déployées sont en effet très variables selon les scénarios, avec parfois un transfert important vers les **motorisations au gaz** ou les **véhicules électriques**. De même, les carburants liquides et gazeux connaissent une pénétration plus ou moins importante des carburants d'origine renouvelable que sont les **biocarburants** et le **biogaz**. Enfin, seulement deux scénarios tablent sur le développement de l'**hydrogène**.

Les avantages de la transition dans les transports

Même si ces scénarios et l'analyse se focalisent sur les émissions de CO_2, il est important de noter que la majorité des mesures et évolutions préconisées vont également dans le sens d'une **réduction des autres externalités négatives des transports**.

NOMBREUX CO-BENEFICES POUR LA SOCIETE :
Santé, qualité de vie, baisse de la pollution, du bruit, de la congestion, des accidents…

En effet, les scénarios volontaristes tendent vers des transports plus économes en ressources, moins polluants, permettant de réduire le bruit, la congestion, l'accidentologie tout comme l'occupation au sol. De même, le développement des modes actifs présente des avantages certains pour la **santé**, ce qui constitue l'externalité positive la plus importante.

Bien que l'impact de tels scénarios sur le développement des territoires ou les inégalités ne soit pas évalué, les scénarios de transition énergétique qui sont assortis d'une analyse économique pointent les **bénéfices de la transition énergétique pour l'activité économique**, l'emploi ou encore la balance commerciale.

Perspectives d'études

Les mesures et évolutions citées plus haut constituent les principales hypothèses sur l'évolution du système de transport, en plus des hypothèses dites exogènes qui portent essentiellement sur la croissance démographique, la croissance économique et l'évolution des prix de l'énergie.

Etant donné l'impact majeur des hypothèses prévues dans le système des transports sur les résultats des modèles, **un travail plus approfondi sur les potentialités et le réalisme de ces évolutions** paraît nécessaire pour améliorer les futurs scénarios de prospective.

De même, une meilleure compréhension du **fonctionnement des modèles** et de l'**impact des hypothèses** permettrait d'éclairer les trajectoires possibles et l'impact relatif des différentes mesures dans l'atteinte des objectifs de la politique des transports.

Avant-propos

Objet et périmètre de l'étude

Le thème central de l'étude concerne la transition énergétique dans les transports. Plus précisément, l'analyse a pour but d'approfondir les modalités et les mesures nécessaires à l'atteinte de l'objectif de facteur 4 (baisse de 75% des émissions de gaz à effet de serre françaises entre 1990 et 2050) dans les transports.

Le périmètre d'étude concerne aussi bien le transport de voyageurs que le transport de marchandises, bien que le premier sera plus approfondi. L'horizon temporel des travaux de prospective est l'année 2050, avec néanmoins des évolutions envisagées à plus court terme sur certains thèmes.

L'approche principale développée dans l'étude consiste à comparer des scénarios de prospectives à horizon 2050, d'en étudier les principales hypothèses, les mesures déployées, et les résultats. Les principales données d'entrées sont donc les publications des divers organismes ayant réalisé des scénarios de transition énergétique ou des travaux de prospectives à l'échelle des transports. La quasi-totalité des données utilisées est tirée des rapports publics de ces études.

Problématiques et apports de l'étude

Dans ce contexte, l'étude se demande quels sont les types de scénarios de transition énergétiques dans les transports et quels sont leurs résultats ? De plus, quelles évolutions et mesures sont prévues dans ces scénarios pour atteindre la contribution des transports au facteur 4 ?

Les apports que pense faire cette étude par rapport à la littérature déjà existante sur le sujet sont les suivants :

- ✓ L'étude rassemble, résume et analyse les derniers scénarios de prospectives existants dans les transports, selon une grille de lecture facilitant la compréhension et la comparaison de leurs approches, de leurs principales hypothèses et de leurs résultats ;
- ✓ Une étude de comparaison des scénarios de transition énergétique a déjà été réalisée dans le cadre du débat national sur la transition énergétique (Carbone 4, 2014). L'analyse comprend ici un plus grand nombre de scénarios et se veut plus détaillée sur le secteur des transports ;
- ✓ Une analyse comparée et critique des mesures mises en place dans ces scénarios est détaillée ;
- ✓ Une typologie des scénarios de transition énergétique adaptée au secteur des transports a été créée. Elle est faite de manière à pouvoir classer facilement de nouveaux scénarios qui pourraient voir le jour ;
- ✓ De plus, les logiques de construction des modèles et des scénarios sont comparées, et des préconisations pour de futurs scénarios sont proposées, en se basant sur les exemples intéressants rencontrés dans les différentes études analysées ;
- ✓ Enfin, les types de mesures et de leviers identifiés dans la comparaison des scénarios sont testés dans un modèle simple de répartition entre RER et voiture.

Afin de préciser la portée de ce travail, il ne prétend pas apporter de réponse tranchée sur ce qu'il faut ou ne pas faire pour mener la transition énergétique dans les transports. L'étude souhaite plutôt présenter les différentes options, leurs avantages et inconvénients, et les résultats qu'on peut attendre de chacune d'entre elles. De même, la comparaison des scénarios ne vise pas à les classer selon leur utilité, mais plutôt à analyser l'approche retenue, leur domaine de pertinence, leur éventuelle originalité, et la complémentarité possible de ces approches pour étudier et conduire la transition énergétique dans les transports.

Plan du rapport

L'étude est divisée en 4 chapitres, avec un premier chapitre introductif, ensuite la comparaison des scénarios et de leurs résultats, une analyse des mesures et évolutions préconisées, et enfin une discussion afin d'ouvrir des perspectives.

Le premier chapitre a pour objectif de présenter un état des lieux des transports et de la mobilité aujourd'hui, et des défis auxquels elle est confrontée. Les problématiques de changement climatique et de dépendance au pétrole sont développées, afin de bien cerner l'importance des enjeux dont il est question dans l'étude. Les autres externalités des transports sont également présentées plus brièvement.

Ensuite, la comparaison des scénarios est présentée, en s'attachant à détailler la méthodologie utilisée, les différents types de scénarios étudiés, en conséquence la typologie proposée dans cette étude, et les principaux résultats des scénarios.

Le troisième chapitre analyse avec un recul critique les mesures et évolutions qui sont prévues dans les transports pour les scénarios étudiés. Une illustration de l'impact de ces mesures est réalisée dans l'application numérique d'un modèle de répartition entre RER et voiture.

Enfin, en guise de discussion et d'ouverture, les principales observations de la comparaison des scénarios sont résumées, avant de discuter les hypothèses utilisées dans les modèles, et de conclure avec des préconisations pour les scénarios de transition énergétique dans les transports.

1. Les défis de la mobilité aujourd'hui et demain

1.1. Satisfaire à la demande de transport

1.1.1. Etat des lieux et évolution des comportements de mobilité des Français

En 2014, le transport intérieur de voyageurs représente 1000 milliards de voyageurs-kilomètres (Mds v-km, un v-km représente un kilomètre réalisé par un voyageur). Bien que cela ne représente pas exactement la mobilité des Français (non prise en compte de leurs déplacements internationaux, prise en compte des déplacements d'étrangers en France), ce chiffre représente l'équivalent de 15 000 km par personne et par an, ou environ 42 km/jour.

Le transport individuel est largement dominant avec 83,0 % du total, dont 74 % pour les voitures particulières (VP) françaises, 7,6 % pour les VP étrangers, et 1,4 % pour les deux-roues motorisés. Les transports collectifs (TC) représentent 17,0 % (voir Figure 1 ; CGDD, 2015).

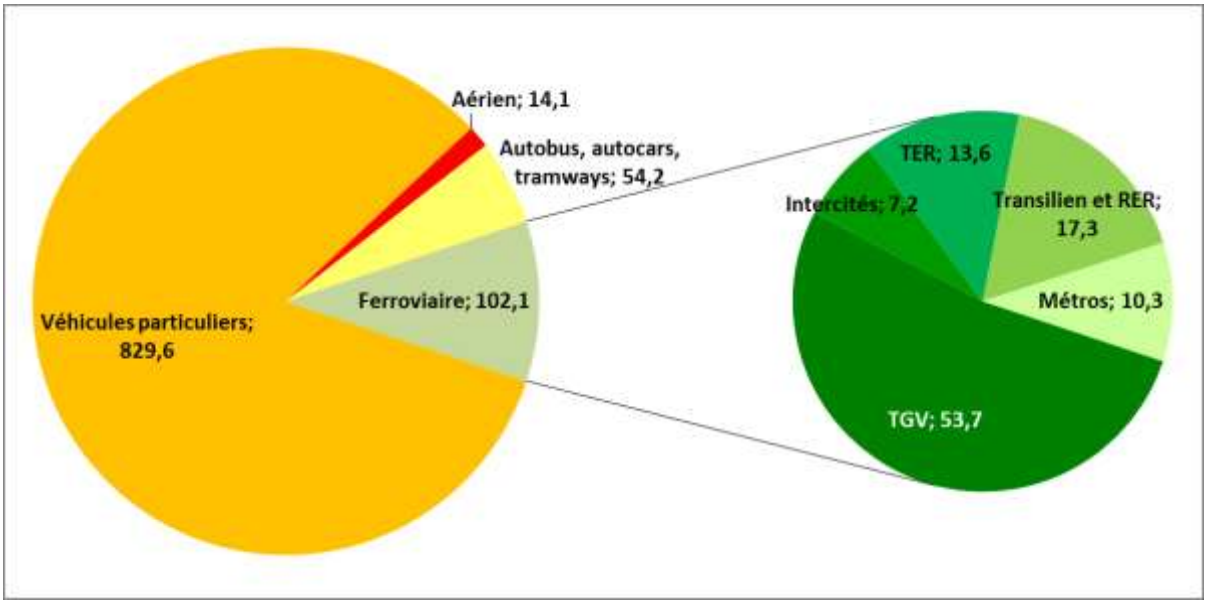


Figure 1 : Transport intérieur de voyageurs en France en 2014, en Mds v-km (d'après données CGDD, 2015)

1.1.1.1. Une mobilité globale toujours en augmentation

Les données les plus complètes pour suivre l'évolution des comportements de mobilité sont les enquêtes nationales sur les transports et déplacements (ENTD). La dernière enquête de ce type remonte à 2008 (les résultats sont repris dans l'étude CGDD, 2010), certaines tendances ayant changé depuis, d'autres données plus récentes sont mobilisées.

L'enquête de 2008 montrait une progression de la mobilité des Français, avec une stabilité du nombre de déplacements quotidiens (3,15 déplacements par jour en moyenne), mais un allongement de leur distance et de leur durée, tandis que la mobilité à longue distance (supérieure à 80 km du domicile) augmentait de 5,5 voyages par an en 1994 à 6,4 voyages en 2008, pour une distance moyenne de ces déplacements à peu près stable (à 944 km).

Depuis la crise, cette tendance continue puisque la mobilité globale a augmenté de 0,6% par an entre 2008 et 2014 en v-km (CGDD, 2015).

1.1.1.2. Les critères de différenciation des usagers

Globalement, l'enquête de 2008 montre que les facteurs d'âge, de genre ou de classe sociale influencent moins la mobilité que pour les 2 enquêtes précédentes en 1982 et 1994, tandis que le lieu de résidence reste un marqueur important d'inégalités de mobilité. Sans trop rentrer dans les détails et la complexité des comportements de mobilité, quelques tendances peuvent être relevées.

Le **lieu de vie** et en particulier le type de commune conditionne fortement la mobilité. En milieu rural, la part des habitants ayant accès à une ligne de transports en commun à moins d'un kilomètre de leur domicile était seulement de 9 à 16% en 2008, contre 96% pour Paris (SOeS, cité par Alternatives économiques, 2016). Ainsi, la voiture représente 93% de la mobilité (en v-km) en milieu rural, contre 38% à Paris (négaWatt, 2014). La part de la voiture est ainsi plus faible dans les zones denses, qui facilitent l'utilisation de la marche, du vélo, et l'organisation d'un système efficace de transports en commun (CAS, 2012). De même, les distances parcourues en mobilité locale sont plus faibles dans les zones denses (CGDD, 2010).

Les personnes ayant des **revenus** plus élevés (par unité de consommation, UC) se déplacent plus. Pour les déplacements locaux, les personnes ayant de plus faibles revenus sont celles qui ont le plus faible nombre de déplacements journaliers, et qui utilisent le moins la voiture, et ceux qui utilisent le plus les transports en commun et la marche. Les inégalités selon les niveaux de revenus mais aussi selon les catégories socio-professionnelles sont plus fortes encore pour la mobilité à longue distance. La fréquence des voyages personnels passe ainsi d'environ 3 par an à 9 entre le premier et le dernier décile de revenu, et de 3,77 à 8,49 entre un ouvrier et un cadre. De plus, les personnes n'ayant réalisé aucun voyage pendant une période 3 mois a augmenté entre les enquêtes de 1994 et 2010, de 47,6% à 46,1%. Enfin, malgré une légère démocratisation de l'usage de l'avion entre 1994 et 2008, son usage reste cantonné aux plus hauts revenus, puisque les 7 premiers déciles de revenus ont un usage de l'avion bien inférieur à la moyenne nationale (CGDD, 2010).

L'**âge** différencie fortement les comportements de mobilité, aussi bien sur la répartition modale que sur le volume de mobilité, qui est maximum pour les 26-45 ans, au cœur de la vie active. Bien que les comportements des retraités aient pu se rapprocher des actifs (CGDD, 2010), leur mobilité est plus faible et la part des plus de 65 ans augmente dans la population : 46% d'entre eux sont immobiles du lundi au samedi, alors qu'ils représentent désormais 24% de la population. Leur répartition modale change également, puisqu'ils utilisent plus facilement la marche à pied. Au contraire, c'est entre 11 et 17 ans que la pratique du vélo et l'utilisation des transports en commun est maximale (OPECST, 2014).

Le **genre** est de moins en moins un marqueur des comportements de mobilité, puisque le comportement des femmes se rapproche de celui des hommes, que ce soit sur le taux de possession du permis de conduire (qui est passé de 47% à 72% de 1982 à 2010, contre 81% pour les hommes), la régularité de la conduite en voiture (80% de conductrices régulières contre 87% pour les hommes), ou le temps de déplacement par jour qui s'est également allongé (OPECST, 2014).

1.1.1.3. Une place prédominante de la voiture peu à peu remise en cause

Comme cela a déjà été vu précédemment, l'usage de la voiture est prépondérant dans la mobilité des Français, aussi bien pour la mobilité locale que pour la longue distance. Avec une part de 83% des v-km au niveau national, la part de la voiture est encore plus élevée dans les zones peu denses, chez les ménages les plus aisés, et au moment de la vie active.

La mobilité automobile a des avantages importants, en termes de vitesse, de disponibilité, de confort, et pour la possibilité de faire des trajets de porte-à-porte, ce que ne permettent pas aussi facilement les transports en commun par exemple, ou les modes actifs qui sont réservés aux courtes distances.

Cependant, une partie importante des déplacements dispose d'alternatives à la voiture. Ainsi, parmi les 14,6 millions d'actifs qui se rendent sur leur lieu de travail en voiture, 6,3 millions d'entre eux (soit 43%), essentiellement dans les zones urbanisées, pourraient aller au travail par un autre moyen de transport (CGDD, 2010). Cela laisse de fortes possibilités de report modal pour les trajets domicile-travail, à urbanisme et localisation des ménages et des entreprises constants. Les raisons évoquées concernent le temps de transport à 40%, devant l'inadaptation des horaires des TC, le confort, ou encore la fatigue liée aux modes actifs.

Malgré cette place importante de la voiture, de récentes évolutions remettent en cause la place de la voiture, parmi lesquelles :

- ✓ L'ENTD de 2008 montre une stabilisation de son usage entre 1994 et 2008 dans les grandes villes de province et un recul à Paris (CGDD, 2010) ; d'autres chiffres montrent une part de marché en recul dans de nombreuses grandes agglomérations (Certu, 2012 ; Figure 2).
- ✓ Par ailleurs, un tassement du trafic routier est observé depuis le début des années 2000, tandis que les TC urbains et les modes ferrés ont fortement progressés dans le même temps, et qu'un regain est observé sur la pratique du vélo (CGDD, 2015) ;
- ✓ Moins de la moitié des 18-25 ans ont le permis, ce qui est moins qu'auparavant, où il était vu comme un droit fondamental à 18 ans (OPECST, 2014). De même, l'essor du covoiturage et de l'autopartage témoignent d'un rapport différent à la voiture ;
- ✓ Enfin, la voiture bénéficie d'une image contrastée, une enquête faisant ressortir 91% de qualifications positives (devant les TC à 81% et le vélo à 87%), mais aussi 66% de qualifications négatives (devant les TC à 58% et le vélo à 43%) : elle est notamment jugée chère et polluante (SNCF, 2016).

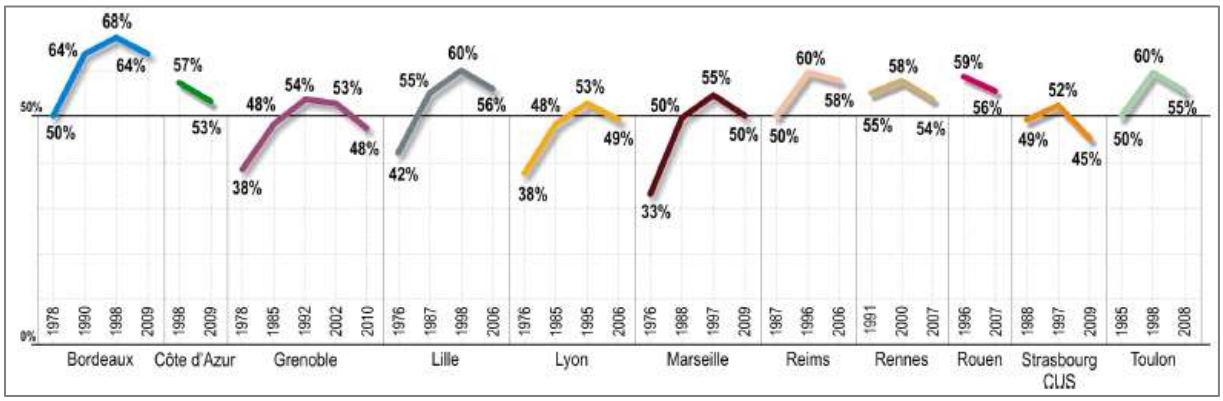


Figure 2 : Evolution de la part de marché de la voiture dans les grandes agglomérations françaises (Certu, 2012 ; d'après EMD standard Certu)

1.1.2. Le transport de marchandises également dominé par le mode routier

Le transport de marchandises est fortement dépendant de la croissance économique, et subit fortement la crise économique. En effet, depuis 2008, le trafic terrestre baisse de 2,5% en moyenne annuelle. Il s'établit en 2014 à 328,5 milliards de tonnes-kilomètres (Mds t-km), hors oléoducs (CGDD, 2015).

La part du mode routier se stabilise également depuis 2008 à environ 87-88 % (Figure 3), dont une part importante est due au pavillon étranger. La part du non routier est passée de 23,5% des t-km intérieures en 1990 à 12,2% en 2009, principalement en raison de la baisse du trafic ferroviaire, qui a décru de 40% sur la période, pendant que le trafic fluvial restait à peu près constant (CGDD, 2015).

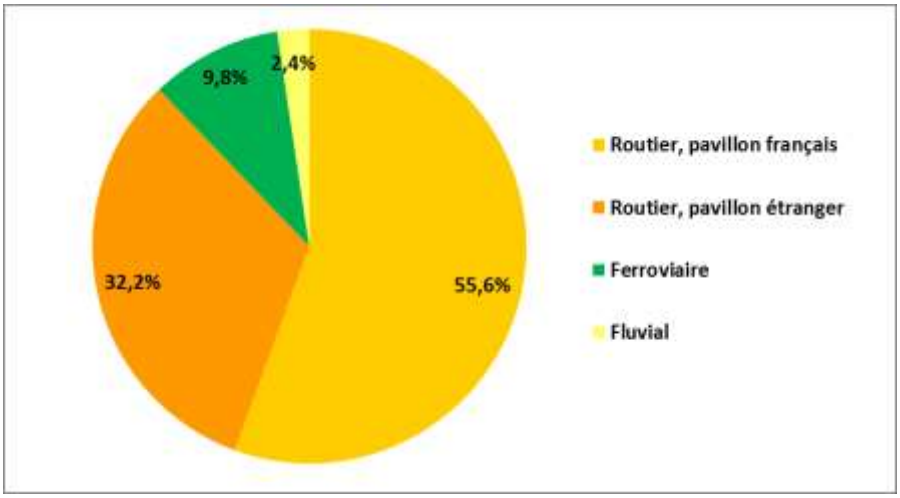


Figure 3 : Répartition modale des transports terrestres de marchandises en France, hors oléoducs. Total : 328,5 Mds t-km (d'après données CGDD, 2015)

En fonction du type de marchandises transporté, la répartition modale change relativement peu, à part une part plus importante des modes non routiers pour les matières premières. Enfin, les produits manufacturés ont été les plus affectés par la crise (Figure 4).

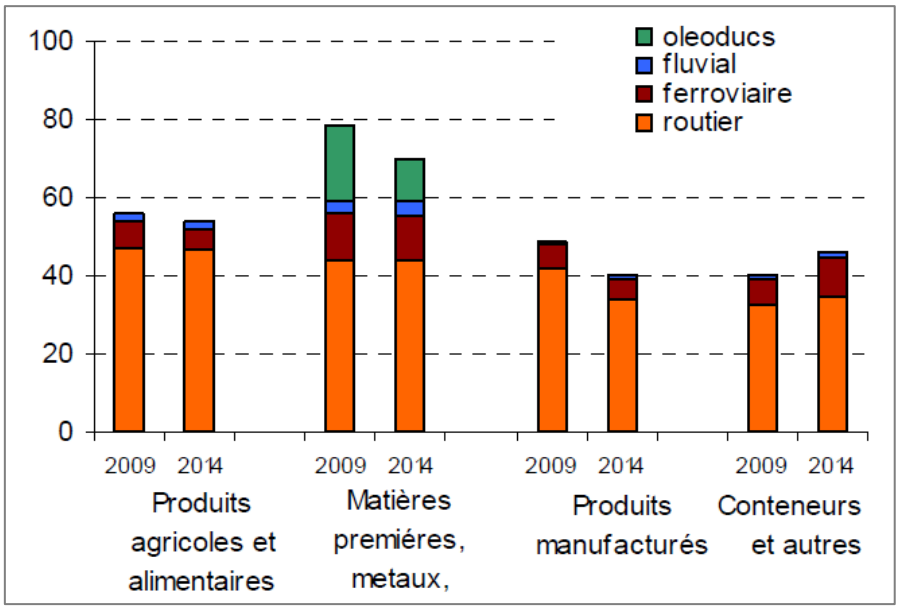


Figure 4 : Transport intérieur terrestre par type de marchandises et mode, en Mds t-km (CGDD, 2015)

1.2. Réduire les externalités négatives, promouvoir les externalités positives

1.2.1. Changement climatique : développer une mobilité sobre en CO_2

1.2.1.1. Un défi majeur du siècle à venir

Les causes du changement climatique

Depuis la 1ère révolution industrielle, la combustion des énergies fossiles (charbon, et plus tard pétrole puis gaz) ainsi que la déforestation et l'agriculture ont émis d'importantes quantités de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Ces gaz ont la propriété de laisser passer l'énergie solaire incidente et de capter une partie des rayonnements infrarouges réémis par la terre vers l'espace, provoquant ainsi son réchauffement. Le phénomène naturel d'effet de serre, sans lequel la température atmosphérique moyenne serait de -19°C, est renforcé par les émissions anthropiques, qui ont déjà provoqué un réchauffement de la température moyenne de surface de 0,85 °C entre 1880 et 2012. Selon les scénarios d'émissions de GES durant les décennies à venir, la température pourrait encore augmenter de 1 à 3,7 °C au cours du XXIème siècle (IPCC, 2013).

Les émissions de gaz à effet de serre humaines en 2010 concernaient : le dioxyde de carbone (CO_2) à 76 %, majoritairement émis par la combustion des énergies fossiles et la déforestation, puis le méthane (CH_4, à 16 %) et le protoxyde d'azote (N_2O, à 6 %) qui proviennent majoritairement des activités agricoles, et 2% de gaz fluorés. Les émissions mondiales étaient de 49 milliards de tonnes équivalent CO_2 (Mds teqCO_2), dont 14,4 % liées aux transports (Figure 5). Les autres émissions se partageaient entre : 31,9 % pour l'industrie au sens large (dont industrie de l'énergie et déchets) ; 23,9 % pour l'agriculture et la déforestation ; et 18,6 % pour le secteur du bâtiment (IPCC, 2014a). Cette répartition est quelque peu modifiée pour la France, où les émissions des transports ont une place bien plus importante (28 % ; MEDDE, 2015a).

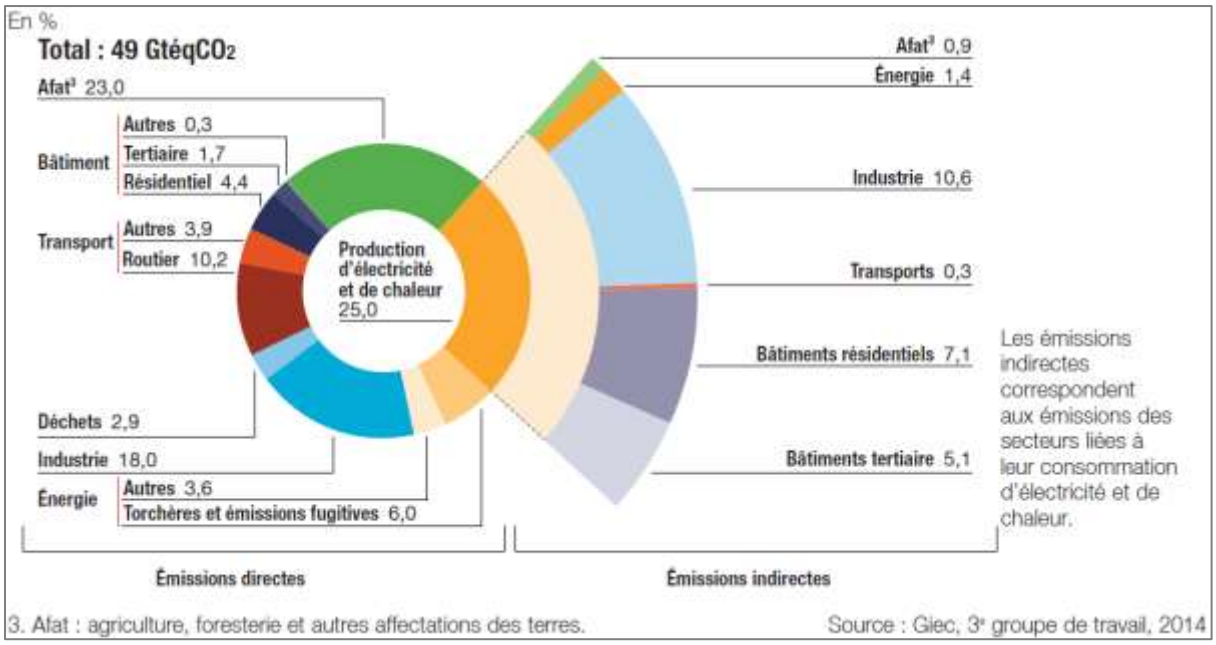


Figure 5 : Répartition mondiale des émissions de gaz à effet de serre par secteur en 2010 (MEDDE, 2015a)

Les conséquences et effets d'emballement

Les conséquences du changement climatique sont déjà visibles, et l'ampleur des conséquences à venir dépendra de la trajectoire mondiale des émissions de GES, et vont au-delà de la simple élévation de température moyenne : montée du niveau de la mer, augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (canicules, feux de forêts, inondations, etc.), saisons et climats secs et humides accentués, fonte des glaces, etc.

Ces impacts physiques du climat auront des répercussions sur les systèmes naturels et les populations : baisse de rendement des cultures agricoles, perte de biodiversité, risques pour la santé, ou encore destruction d'infrastructures. Les régions et les populations les plus vulnérables sont globalement les régions les plus pauvres, qui n'auront pas les moyens de s'adapter, en particulier en Afrique, en Asie du sud-est et en Amérique latine (Climate Change Vulnerability Index ; Maplecroft, 2016). Un fort changement climatique compliquerait la réduction de la faim et de la pauvreté dans le monde, et augmenterait les migrations et les risques de conflit (IPCC, 2014b).

La trajectoire d'émissions actuelles au niveau mondial est proche du scénario RCP8.5 du GIEC (IPCC en anglais), le plus pessimiste des 4 trajectoires, qui prévoit un réchauffement de 3,7°C durant le XXIème siècle (2,6 à 4,8°C dans l'intervalle de confiance 5-95% du modèle ; IPCC, 2013). De telles augmentations sont proches du réchauffement de 5°C que la terre a connu lors de la dernière déglaciation, cette fois sur une durée d'environ 10 000 ans, transformant fortement les paysages mondiaux.

Un changement si important et rapide questionne ici la capacité d'adaptation des systèmes naturels et des sociétés humaines. Il présente aussi le risque de déclencher des effets d'emballement du climat :

- ✓ La fonte des glaces entraine une diminution de l'albédo (part du rayonnement solaire qui est réfléchi), les rayonnements seront par exemple plus facilement absorbés par l'eau que par la banquise, renforçant le réchauffement des eaux et donc la fonte des glaces ;
- ✓ De même, l'augmentation de la température de l'océan limite sa capacité d'absorption du CO_2 (un gaz à effet de serre), et l'océan pourrait même devenir émetteur net à terme, alors qu'il absorbe environ 25% de nos émissions actuellement ;
- ✓ Les forêts pourraient également devenir émettrices de CO_2 lors d'épisodes de sécheresses, ou si elles ne peuvent pas s'adapter à un changement trop important et rapide du climat local ;
- ✓ Enfin, la fonte du permafrost (sol gelé en permanence) pourrait libérer de grandes quantités de CO_2 et de CH_4 (méthane) emprisonnées sous les glaces.

Limiter le réchauffement à 2°C

Face aux menaces du changement climatique, la communauté internationale s'est fixée pour objectif lors de la conférence de Copenhague en 2009 de ne pas dépasser un réchauffement de 2°C d'ici 2100, comparé à l'ère préindustrielle. Cet objectif a été confirmé par la COP21 à Paris en décembre 2015, où a même été ajouté l'objectif de tendre vers un réchauffement limité à 1,5°C.

Bien que cet horizon soit lointain et que l'objectif ne semble pas insurmontable à première vue, il représente en fait une inflexion rapide de la trajectoire des émissions de GES. Alors que les émissions de CO_2 sont toujours en augmentation ces dernières années, le scénario RCP2.6 du GIEC qui permet de rester sous les 2°C avec une probabilité de 66%, prévoit que les émissions mondiales de CO_2 doivent baisser de 40 à 70% entre 2010 et 2050, et atteindre des émissions nettes (émissions moins stockage de CO_2) proches de zéro pour la fin du siècle (IPCC, 2014a).

Ces réductions sont calculées à partir des budgets carbones, qui correspondent aux émissions cumulatives sur plusieurs années. En effet, la relation avec la quantité de CO_2 émise et la température associée est relativement bien établie. Pour avoir une probabilité supérieure à 66% de rester sous les 2°C, les émissions cumulatives sur la période 2011-2050 ne doivent pas dépasser 1000 Mds tCO_2. Cela correspond à 26 fois les émissions de 2011 (de 38 Mds tCO_2), le budget serait donc épuisé en 2037 à émissions constantes. Le pic des émissions mondiales doit donc arriver d'ici les années 2020 avant que celles-ci décroissent fortement. A noter aussi qu'environ deux tiers du budget carbone total ont déjà été utilisés, puisque les émissions cumulatives sur la période 1870 à 2011 ont été de 1900 Mds tCO_2 (IPCC, 2014a).

Enfin, une dernière façon de voir l'équation à résoudre est de raisonner en termes de quantité d'énergies fossiles à laisser sous terre. Etant donné que les réserves prouvées d'énergies fossiles sont largement supérieures aux quantités de carbone que l'humanité peut se permettre de brûler d'ici la fin du siècle pour rester sous les 2°C, une partie de ces ressources techniquement et économiquement accessibles doit rester inexploitée. En l'occurrence, un article publié dans la revue *Nature* suggérait que pour rester sous les 2°C, il faudrait laisser sous terre d'ici 2050 un tiers des réserves de pétrole, la moitié des réserves de gaz naturel et plus de 80% des réserves de charbon (McGlade & Ekins, 2015).

Les pistes d'actions

La stratégie pour faire face au défi du changement climatique est double, elle consiste à la fois à réduire les émissions de gaz à effet de serre (la mitigation, ou l'atténuation), et à limiter les conséquences déjà présentes et prévisibles du changement climatique (l'adaptation).

Cette étude se concentre sur l'atténuation du changement climatique, et sur la manière de baisser les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports. Comme cela sera remarqué plus tard pour l'atteinte des objectifs des transports, il est nécessaire qu'au-delà des changements de technologie, les pouvoirs publics encouragent des changements importants dans les modes de production (les entreprises) et de consommation (les citoyens / consommateurs). Devant l'ampleur du problème, la coopération et l'implication de tous les acteurs est donc nécessaire, à tous les niveaux (depuis le niveau international jusqu'au niveau individuel), et dans tous les secteurs (énergie, industrie, agriculture, transports, logement…).

La situation rappelle ainsi le dilemme du prisonnier utilisé en théorie des jeux, dans un contexte où chaque acteur n'a pas intérêt à agir seul (il supporte ici seul les coûts de l'atténuation sans en avoir tous les bénéfices), où la pire situation est que personne n'agisse (fortes conséquences du changement climatique), et la meilleure est que tout le monde agisse.

1.2.1.2. Les émissions du secteur des transports

Il a été vu précédemment que les émissions des transports représentaient 14,4% des émissions totales de gaz à effet de serre au niveau mondial. De plus, il est nécessaire de réduire les émissions de CO_2 de 40 à 70% d'ici à 2050 pour rester sous l'objectif des 2°C, ce qui va demander des efforts importants notamment dans le domaine des transports.

Pourtant, l'OCDE projette à 2050 de très fortes augmentations des trafics et des émissions des transports au niveau mondial, tirées par les économies des pays hors OCDE. En effet, le transport routier et ferroviaire de personnes devrait par exemple être multiplié par 2,2 à 3,3 à l'horizon 2050, entrainant ainsi les émissions de CO_2 à la hausse d'un facteur 1,3 à 2,1. La croissance économique couplée à la libéralisation multilatérale des échanges devraient tirer à la hausse les volumes de fret dans des proportions encore plus importantes que pour les passagers. Les trafics seraient multipliés par 3,3 à 5,2 pour le fret routier et ferroviaire, et de 4,3 pour le trafic international de fret commercial, et les émissions de CO_2 pourraient augmenter d'un facteur 2,4 à 4,5 pour le fret routier et ferroviaire, et d'un facteur 3,9 pour le fret international (OCDE et FIT, 2015).

De telles augmentations des émissions de CO_2 vont bien entendu à l'encontre des réductions nécessaires pour limiter le changement climatique à +2°C, et des stratégies visant à inverser ces tendances doivent être développées, aux niveaux français et mondial. Cependant, il est possible que la contrainte physique sur l'extraction de pétrole rende impossible de telles croissances des trafics, question abordée dans la prochaine partie consacrée aux ressources.

Les émissions mondiales de CO_2 liées aux transports sont passées 2,8 Mds teqCO_2 en 1970 à 7,0 Mds teqCO_2 en 2010, soit une multiplication par 2,5 en 40 ans. Les émissions se répartissent entre environ 72% pour le mode routier, 11% pour les transports aériens, 11% pour les transports maritimes et fluviaux, 1,6% pour le ferroviaire et 4,5% autres (pipelines, HFC et N_2O indirect). Par ailleurs, les émissions indirectes de la production d'électricité ne sont pas comptées et comptent pour un peu plus de 2% en plus (Figure 6 ; IPCC, 2014c).

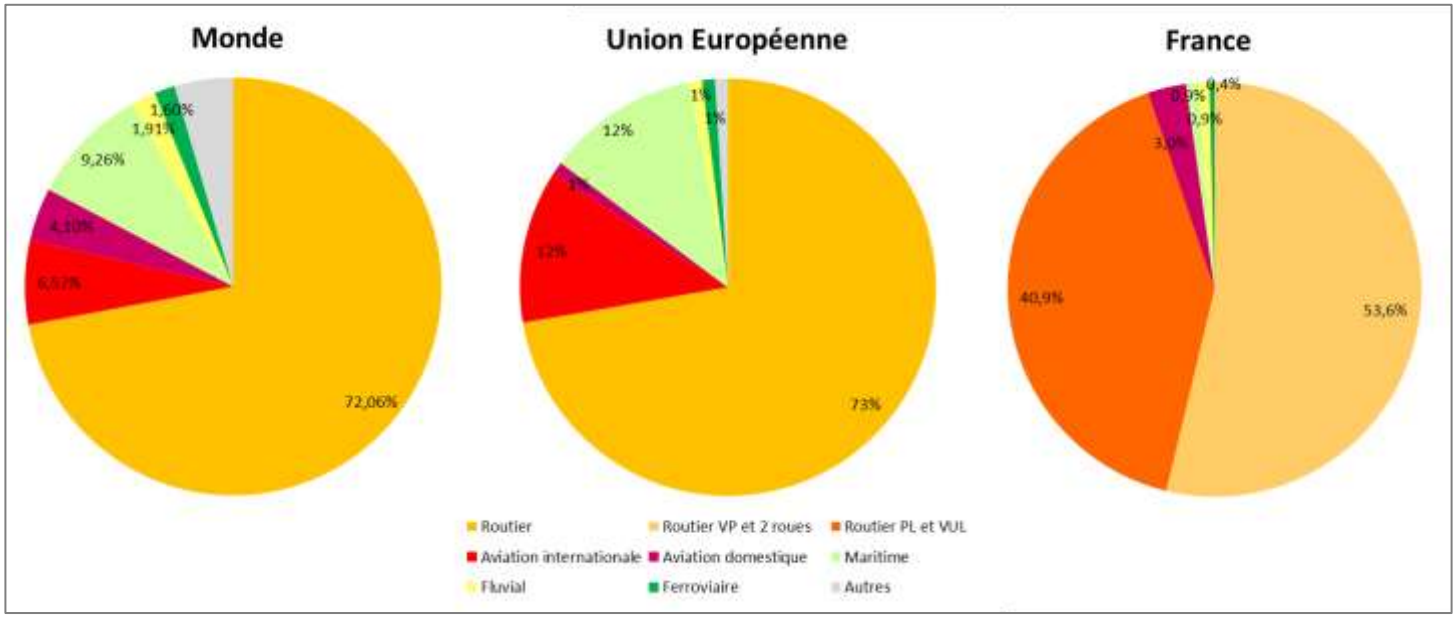


Figure 6 : Répartition des émissions de CO_2 des transports par mode au niveau mondial (en 2010 ; IPCC, 2014c), dans l'Union Européenne (en 2014 ; European Commission, 2016) et en France (en 2013 ; MEDDE, 2015a)

Au niveau français, les émissions des transports représentaient 131,4 MteqCO_2 en 2013, soit 28% des émissions de GES françaises hors UTCF, en légère baisse depuis 2004 (MEDDE, 2015a ; CGDD, 2015). Cela correspond à moins de 2% des émissions mondiales des transports. Cependant ce chiffre n'inclut pas la part française des émissions maritimes et aériennes internationales, ce qui explique la part ici plus forte des transports routiers (94,5 %).

Les émissions moyennes de CO_2 d'un français sont d'environ 2 tCO_2 par an. Les résultats de la dernière enquête nationale transports déplacements (ENTD) en 2008 montraient que les émissions individuelles variaient selon le lieu de résidence des ménages, depuis environ 1,3 tCO_2 par an pour les habitants de Paris à 2,8 tCO_2 par an pour les habitants de la couronne périurbaine des aires urbaines de plus de 500 000 habitants. En effet, les habitants des centres villes ont des émissions liées à la mobilité locale plus faibles (de 0,4 tCO_2 pour les habitants de Paris, plus de 2 tCO_2 pour les plus élevés). Au contraire, les habitants de Paris ont les émissions les plus importantes pour la mobilité longue distance (CGDD, 2010).

Pour les émissions de CO_2 par voyageur.kilomètre (v-km), le mode ferroviaire est le moins émetteur, en raison de sa bonne efficacité énergétique et son approvisionnement énergétique majoritairement à l'électricité, qui est peu carbonée en France. La valeur plus importante pour le TER s'explique par la moyenne entre les TER qui fonctionnent à l'électricité (9 gCO_2/v-km) et ceux qui fonctionnent au diésel (77 gCO_2/v-km ; MEDDE, 2012). Ensuite viennent les bus et cars, les voitures particulières, puis les avions. Les émissions sont plus fortes pour les distances plus courtes, ce qui s'explique par les consommations au kilomètre plus faibles pour les longues distances et par les taux de remplissage en voiture plus forts pour les longues distances (Figure 7Figure 6).

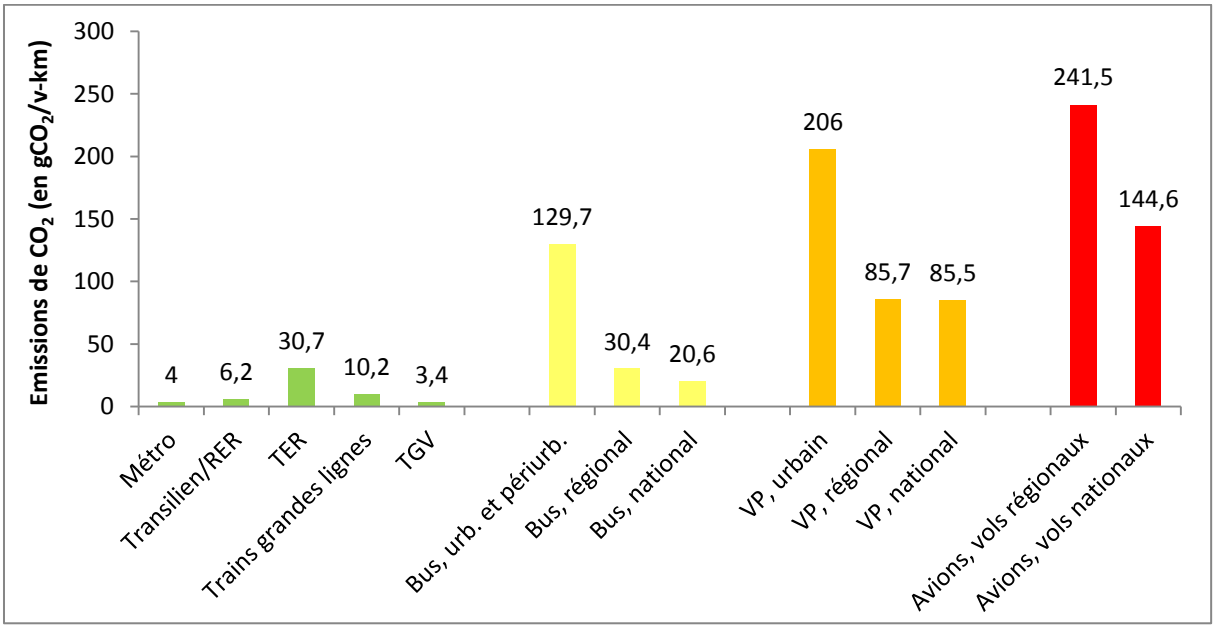


Figure 7 : Emissions de CO_2 par voyageur.kilomètre en France pour les modes de transports ferroviaires, le bus, les voitures particulières (VP) et l'avion, pour différents types de distance (d'après données ADEME, 2016a)

Il est utile de garder en tête que les chiffres de la Figure 7 correspondent à des valeurs moyennes, et que les émissions par v-km par exemple de la voiture dépendent aussi du modèle de voiture et de sa consommation, du nombre de personnes à bord, ou encore de la vitesse et du type de conduite adopté.

1.2.1.3. Le facteur 4 et autres objectifs de la politique française

Les objectifs de la France sont de plus en plus intégrés au contexte international. La France s'est engagée dès 1997 dans le protocole de Kyoto à stabiliser ses émissions entre 1990 et la période 2008-2012, ce qu'elle a réussi à respecter puisque les émissions nationales ont baissé de 10,6% (MEDDE, 2015a). Cela cache cependant une augmentation de l'empreinte carbone de la France si le solde net des émissions importées est ajouté (CGEDD, 2013 ; ADEME, 2016a).

Par ailleurs, de nombreux engagements sont pris au niveau européen, comme le paquet climat-énergie qui fixe notamment les objectifs des « 3 x 20 » à l'horizon 2020, dont celui de diminuer de 20% les émissions de l'UE entre 1990 et 2020.

En 2005, la France a adopté la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique (dite loi POPE), qui fixe l'objectif de réduire de 75% les émissions de gaz à effet de serre françaises entre 1990 et 2050. Cet objectif de division par quatre des émissions est appelé « **Facteur 4** ». Cela tient compte de l'effort plus important à faire pour les pays développés pour diviser par deux les émissions mondiales à l'horizon 2050 (DNTE, 2013).

Par ailleurs, le facteur 4 concerne l'ensemble des émissions de GES, donc également les émissions qui ne concernent pas le CO_2 lié à la combustion d'origine énergétique. Etant donné que ces émissions hors « CO_2 énergétique » sont plus difficiles à réduire, avec par exemple au mieux un facteur 2 sur les émissions agricoles, négaWatt préconise plutôt un minimum de facteur 6 à 7 pour les émissions de CO_2 liées à l'énergie (négaWatt, 2014).

De même, la croissance démographique oblige une division des émissions individuelles par un facteur supérieur à 4. Entre 1990 et 2015, la population française est passée de 58 millions à plus de 66 millions d'habitants, soit une croissance de 14% (INSEE, 2016a). Comme il sera vu dans les prospectives à 2050, la population pourrait dépasser les 72 millions d'habitants à cette échéance (soit +25% environ), ce qui imposerait donc un facteur 5 sur les émissions de GES individuelles.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), adoptée en 2015, fixe des objectifs supplémentaires pour la politique énergétique française (MEDDE, 2015b) :

- ✓ Réduction des émissions de GES de 40% entre 1990 et 2030, et confirmation de l'objectif de facteur 4 ;
- ✓ Réduction de la consommation énergétique finale de 50% entre 2012 et 2050 ;
- ✓ Réduction de la consommation d'énergies fossiles de 30% entre 2012 et 2030 ;
- ✓ Augmentation de la production d'énergie renouvelable à 32% de la consommation d'énergie finale et 40% de la production d'électricité en 2030 ;
- ✓ Réduction de la part du nucléaire à 50% de la production d'électricité en 2025.

Dans la continuité de la LTECV, la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) a précisé les objectifs par secteur, en leur assignant le montant des budgets carbones indicatifs (MEDDE, 2015c). Ainsi, pour le secteur des transports, l'objectif est de baisser les émissions de 29% à l'horizon du 3ème budget carbone (2024-2028) par rapport à 2013 (Figure 8). Il n'est pas précisé si ces objectifs de réduction diffèrent pour le transport de voyageurs et pour le transport de marchandises.

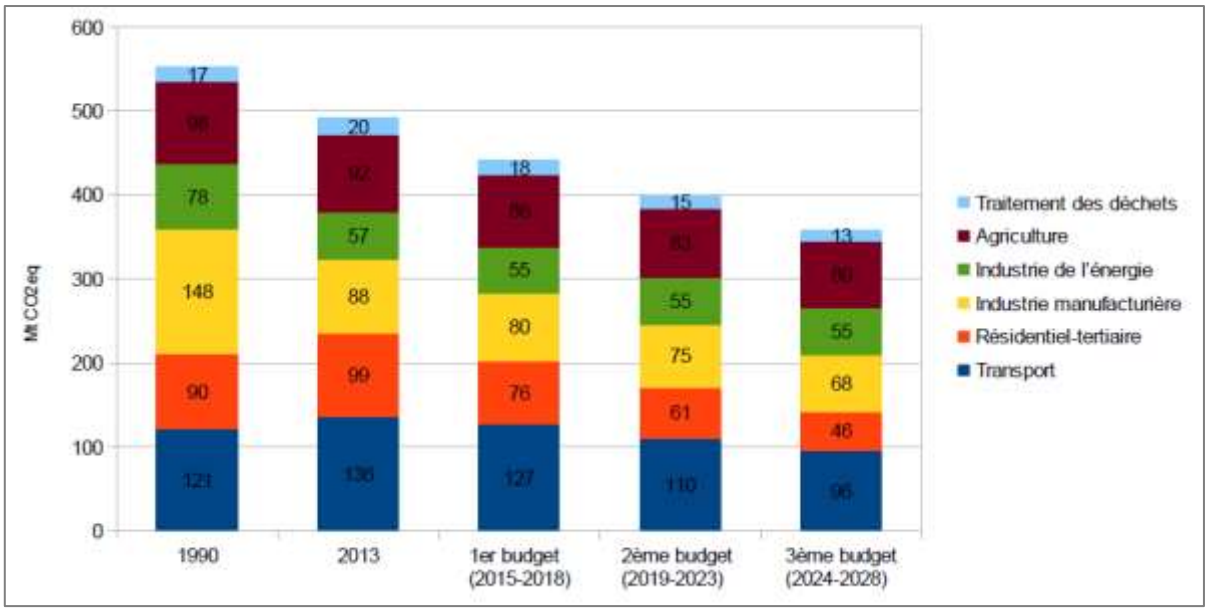


Figure 8 : Répartition sectorielle indicative des premiers budgets carbones dans la SNBC (MEDDE, 2015c)

Il est également fixé dans la SNBC que **le secteur des transports doit réduire ses émissions d'au moins 70% d'ici 2050**, toujours par rapport à 2013. Etant donné l'augmentation des émissions du secteur de 12% entre 1990 et 2013, cet objectif correspond à un facteur 3 des transports par rapport à 1990 (-66%). Cependant, étant donné que les contributions des autres secteurs ne sont pas détaillées, il n'est pas possible de vérifier si les contributions de chaque secteur permettent bien d'atteindre le facteur 4.

En 2016, la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) a pour objectif de décliner la stratégie à plus court terme, c'est-à-dire pour les périodes 2016-2018 et 2019-2023. Le projet de PPE a été mis en consultation au 1er juillet 2016 (MEEM, 2016a).

La stratégie de développement de la mobilité propre (MEEM, 2016b), volet mobilité de la PPE, prévoit d'agir conjointement sur les six leviers suivants (certains objectifs et actions sont détaillés) :

- ✓ Maîtriser la demande de mobilité : objectif de 10% de jours télétravaillés en 2030 ;
- ✓ Développer les véhicules à faibles émissions de polluants et de gaz à effet de serre : bonus de 10 000 € pour le remplacement d'un vieux diésel par un véhicule électrique ; objectif d'un parc de 2,3 millions de véhicules hybrides rechargeables et 1,9 millions de véhicules électriques en 2030 ;
- ✓ Développer un marché des carburants alternatifs et déployer des infrastructures : déploiement de 7 millions de points de recharge électriques d'ici 2030 ;
- ✓ Optimiser le fonctionnement des véhicules et les réseaux existants : plan d'action pour le développement du véhicule 2L/100km ;
- ✓ Améliorer les reports modaux vers les modes de transports les moins émissifs : viser une part du fret non routier de 20% pour le transport de marchandises en 2030 ; plan d'action pour le développement des modes actifs, comme la mise en place de l'indemnité kilométrique vélo ;
- ✓ Développer les modes de transports collaboratifs : augmenter le taux de remplissage moyen des véhicules particuliers de 1,8 à 2 en 2030.

1.2.2. Ressources : sortir de la dépendance au pétrole et autres ressources épuisables

1.2.2.1. Différentes familles de contraintes sur l'énergie

La transition énergétique est nécessaire pour répondre au défi du changement climatique, comme il a été vu dans la partie précédente. En réalité, des contraintes importantes existent également sur les ressources énergétiques non renouvelables, nécessitant de se sortir de la dépendance actuelle.

En effet, le système énergétique mondial reposait à plus de 86% sur des ressources épuisables en 2013 (IEA, 2015) : les 3 énergies fossiles dominent avec 31,1% pour le pétrole, 28,9% pour le charbon, 21,4% pour le gaz ; ensuite le nucléaire, qui repose sur des combustibles également épuisables fournissait 4,8% de l'énergie primaire ; enfin, les ressources renouvelables représentent les 13,8% restants, avec 10,2% pour la biomasse et les déchets, 2,4% pour l'hydroélectricité et 1,2% pour les autres énergies renouvelables (solaire, éolien, géothermie…).

Plus généralement, la gestion du système énergétique pose 4 familles de contraintes (hors climat) pour la transition énergétique (selon Geoffron et Monjon, 2012) :

- ✓ S'adapter à l'évolution de la demande, et notamment à la demande croissante les pays émergents, ou pour les usages électroniques, les véhicule électriques, etc. ; dans le même temps, réussir à réduire la demande d'énergie via la sobriété et l'efficacité énergétiques ;
- ✓ Répondre à l'organisation technique des systèmes énergétiques, aux problématiques émergentes d'intermittence des énergies renouvelables, à l'éventuel développement du captage et stockage de carbone (CSC), à l'interconnexion dans le réseau ou encore à la gestion de la flexibilité de la demande ;
- ✓ Sécuriser les approvisionnements, avec les contraintes géopolitiques que cela implique, pour l'approvisionnement en énergie (pétrole, gaz, uranium), mais aussi en matériaux stratégiques (comme les terres rares) pour le développement des énergies renouvelables, de la mobilité électrique etc. ;
- ✓ Enfin la contrainte financière, avec le nécessaire soutien public aux énergies renouvelables, la gestion des risques de hausse du prix des énergies fossiles et de la précarité énergétique.

Ainsi, la transition énergétique est nécessaire pour une double contrainte de changement climatique et d'épuisement des ressources énergétiques, ce qui exige au minimum une forte limitation de la consommation d'énergies fossiles.

Pourtant, l'énergie de manière générale et plus particulièrement les énergies fossiles ont joué un rôle important dans l'histoire plus ou moins récente de l'humanité, et la société en est aujourd'hui fortement dépendante, jusqu'à avoir un impact trop souvent sous-estimé dans l'économie actuelle et ses récents chocs. C'est de cette dépendance à l'énergie dont il est question dans cette partie, en l'illustrant par quelques exemples historiques et des éléments de réflexion sur le rôle de l'énergie dans l'économie, avant de préciser la situation énergétique des transports.

1.2.2.2. L'important rôle historique de l'énergie

L'énergie a joué un rôle majeur dans l'évolution de l'Homme jusqu'à son développement plus récent, bien que sa contribution soit souvent minimisée. Ainsi, de nombreuses étapes majeures de l'histoire humaine ont été permises par une meilleure utilisation de l'énergie, parmi lesquelles :

- ✓ La maîtrise du feu il y a plus d'un million d'années, première source d'énergie importante exploitée par l'être humain, a marqué une rupture majeure. Le feu permet de se chauffer, mais aussi de cuire la nourriture : la moindre dépense d'énergie à mastiquer la nourriture libère du temps et permet la réduction de la taille de la mâchoire ; cela libère de la place à la boîte crânienne pour un meilleur développement du cerveau (Wrangham, 2009). De plus, la nourriture cuite apporte plus d'énergie que la nourriture crue (Discover, 2011) ;
- ✓ Le développement de l'agriculture entre l'an 12 500 et l'an 7 500 av. J.-C. correspond également à une meilleure utilisation de l'énergie extérieure au corps humain, en exploitant de manière plus efficace et concentrée l'énergie solaire utilisée pour les cultures, et en s'aidant de la force des animaux pour le travail de la terre, décuplant ainsi les capacités de travail. Cette révolution néolithique permet la sédentarisation et le regroupement en villages puis en villes, la diversification des activités et la croissance de la population (herodote.net ; Kempf, 2013) ;
- ✓ De même, au Moyen-Age, « la première "révolution marchande" des 12ème et 13ème siècles, qui permit à l'Europe de sortir de la féodalité rurale, coïncide avec la généralisation des moulins à eau et à vent » (Gaël Giraud, dans OilMan, 2014) ;
- ✓ La 1ère révolution industrielle et la découverte de la machine à vapeur coïncide pour sa part avec l'extraction massive de charbon, sans laquelle un tel développement du chemin de fer n'aurait pas été possible ;
- ✓ Enfin, la forte croissance des Trente Glorieuses s'est faite grâce à un développement massif de la consommation de pétrole, qui a été multipliée par 8 au niveau mondial entre 1945 et 1973 (passant de 350 à 2800 Mtep ; The Shift Project Data Portal, 2016). Le pétrole n'est pas à l'origine de cette période d'expansion, puisque sa découverte remonte à la fin du XIXème siècle. Mais il est évident que sans un approvisionnement abondant et bon marché d'énergie, une telle croissance industrielle (et notamment le développement des machines qui nécessitent de l'énergie) n'aurait pas été possible. Autre marqueur de l'importance de l'énergie et tout particulièrement du pétrole dans les Trente Glorieuses : cette période s'est achevée à cause d'une crise pétrolière.

Tout comme l'énergie a pu jouer un rôle important dans les périodes d'expansion, elle a pu aussi s'illustrer dans des périodes de crise, qu'elles soient géopolitiques (depuis la 2nde guerre mondiale aux conflits les plus récents au Moyen-Orient ; Auzanneau, 2015) ou économiques (chocs pétroliers de 1973 et 1979, crise de 2007-2008 comme on le verra).

Il est important de noter que dans toutes ces évolutions, le facteur énergétique n'est jamais seul, et la compréhension de ces événements ne peut être complète que par une analyse multifactorielle. Le point ici était essentiellement de noter que l'énergie a souvent joué un rôle non négligeable, voire central dans l'histoire, et que ce rôle devrait se poursuivre étant donnée la grande dépendance de nos modes de vie et de nos sociétés à l'énergie encore aujourd'hui.

1.2.2.3. L'économie dépendante de l'énergie

L'énergie est indispensable à nos modes de vie actuels, puisqu'elle concerne tous les usages de la vie quotidienne : elle est utilisée dans l'agriculture pour produire nos aliments, elle nous déplace, permet de produire puis déplacer nos biens de consommations, de chauffer nos logements et bâtiments, etc. Sans sources d'énergies exploitées dans la nature, il ne serait pas possible de fournir toute cette énergie par notre seule force physique. Un corps humain entrainé ne peut fournir au maximum que 0,5 kWh (kilowattheure) d'énergie mécanique par jour, alors que notre consommation d'énergie atteint quasiment 100 kWh par jour en France. Pour illustrer cette dépendance, si l'on remplaçait tous les usages énergétiques d'un français par des personnes fournissant le travail physique pour nous, un français moyen aurait besoin de plus de 400 « esclaves énergétiques » à sa disposition (Manicore, 2013).

Il en va de même pour le prix de l'énergie : un kWh obtenu à partir de pétrole revient plusieurs centaines de fois moins cher qu'un kWh obtenu par le travail physique d'un employé. Cela explique en grande partie la mécanisation dans l'industrie pour des postes peu qualifiés, puisqu'un raisonnement purement économique montre que les machines consommant de l'énergie coûtent bien moins cher que l'embauche d'un employé.

Cette dépendance à l'énergie ne se limite pas à nos modes de vie, mais se ressent dans la croissance économique. Ainsi, la croissance mondiale du PIB est fortement corrélée à la croissance de la consommation d'énergie, et cela depuis plusieurs décennies (Figure 9). Au cours des 30 dernières années, l'intensité énergétique de l'économie baisse relativement régulièrement entre 0 et 2 %/an, ce qui signifie qu'en moyenne l'économie est légèrement plus efficace chaque année. En effet, la croissance économique est en général 1 à 1,5% plus élevée que la croissance de la consommation d'énergie (BP, 2016a ; Figure 9).

La dépendance entre l'énergie et le PIB est valable dans les 2 sens : une variation du PIB entraine une variation de la consommation d'énergie dans le même sens, et une variation de la consommation d'énergie entraine une variation dans le même sens du PIB. Une étude montre que le délai d'ajustement entre les deux est d'environ un an et demi (Giraud et Kahraman, 2015).

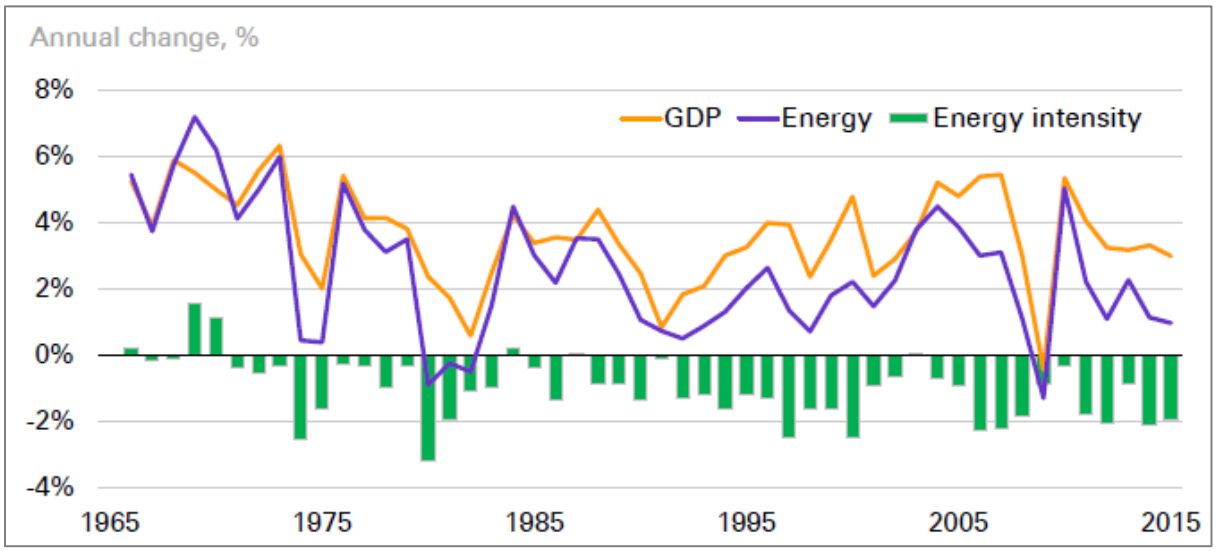


Figure 9 : Croissance annuelle du PIB et de la consommation mondiale d'énergie entre 1965 et 2015 (BP, 2016a)

De plus, contrairement à ce que suggère le théorème de l'enveloppe qui suppose une élasticité du PIB à la consommation d'énergie inférieure à 10% (son « cost share »), l'étude a calculé que le ratio de dépendance du PIB à l'énergie serait plutôt de l'ordre de 60%. Cela indique par exemple qu'une augmentation de 10% de la consommation énergétique entrainerait une croissance du PIB de 6%, et non pas moins de 1% comme suggéré par le théorème de l'enveloppe (étude conduite sur 33 pays sur la période 1970-2011 ; Giraud et Kahraman, 2015). Enfin, l'étude indique une relation causale (au sens de Granger) univoque depuis la croissance de la consommation d'énergie primaire vers la croissance économique, bien que les économistes de l'énergie ne s'accordent pas tous sur ce point.

Cette causalité semble logique lorsqu'il est question des chocs pétroliers de 1973 et 1979. Au contraire, la crise économique de 2007-2008 est très peu reliée aux prix du pétrole, pourtant de nombreux éléments montrent que le pétrole a eu un rôle important dans la crise :

- ✓ Tout d'abord, bien qu'il n'y ait pas eu d'augmentation soudaine des prix du pétrole comme pour les chocs pétroliers des années 70, le prix du pétrole a malgré tout fortement augmenté avant la crise, passant de 9$ en 1999 à environ 60$ en 2006, soit une multiplication supérieure à 6 en 7 ans, avant de s'envoler à 140$ à l'été 2008 (OilMan, 2014) ;
- ✓ Une analyse de Natixis montre un fort impact de cette hausse du pétrole (entre 2005 et l'été 2008) sur l'économie. Elle aurait coûté 2,0 points de PIB aux Etats-Unis où a été déclenchée la crise, et 2,6 points de PIB dans la zone Euro, qui a pleinement subi les conséquences de la crise. Le papier souligne que c'« est assez pour déclencher une crise financière en situation de fragilité financière » (Natixis, 2014) ;
- ✓ La hausse des prix du pétrole a en effet fragilisé les pays de la zone Euro, qui sont importateurs de pétrole, impactant la balance commerciale, renchérissant le coût de production des entreprises, les dépenses des ménages. Cela a impacté le PIB, et le recours à l'endettement a pu être tenté pour préserver son niveau. Il apparait ainsi que les pays les plus fortement impactés par la crise de la dette et en particulier le groupe des PIIGS (Portugal, Italie, Irlande, Grèce et Espagne), sont parmi les pays d'Europe ayant le mix énergétique le plus dépendant au pétrole (OurFiniteWorld, 2015a) ;
- ✓ Par ailleurs, dans ces pays touchés par la crise et notamment pour la France, l'Espagne, les Etats-Unis ou le Japon, c'est d'abord la consommation énergétique qui a diminué (dès 2006 pour certains d'entre eux), avant que le PIB ne soit impacté, indiquant une causalité depuis l'énergie vers l'économie (Manicore, 2015) ;
- ✓ Enfin, aux Etats-Unis, l'inflation passait de 1 à 4,5% entre 2002 et 2006, sous l'effet de la hausse des prix du pétrole et d'un fort afflux de liquidités (notamment les pétrodollars des pays exportateurs, facilitant la baisse des taux d'intérêts). A partir de 2004, la Fed décide d'augmenter les taux d'intérêts de manière proportionnelle au prix du pétrole, ils passeront donc de 1% à 5,25% en l'espace de 2 ans. En plus de l'impact direct de la hausse du prix du pétrole sur les dépenses des ménages ayant pris des crédits subprimes (dont beaucoup des ménages pauvres qui habitent en banlieue, donc fortement dépendants au pétrole), cette hausse des taux d'intérêts aura un impact important sur les défauts de paiement qui ont déclenché la crise des subprimes (Les Verts - ALE, 2012).

Pour prévoir la situation future, cela s'avère plus compliqué, surtout pour anticiper le prix à venir du pétrole, sujet où les analyses divergent encore plus que sur l'importance du pétrole dans l'économie. Quelques tendances de fond plus ou moins récentes et leur analyse peuvent néanmoins fournir des informations pour les années à venir :

- ✓ L'AIE annonçait en 2010 que le pic pétrolier du pétrole conventionnel (facilement accessible et exploitable, donc peu cher) avait été passé en 2006 (Oil Man, 2010). Ce pic a participé à la forte augmentation des prix, et a eu lieu juste avant la crise économique. L'augmentation de la production que l'on connaît depuis n'est donc que le résultat du développement des pétroles non conventionnels (pétroles de schiste, sables bitumineux, offshore profond, etc.) ;
- ✓ Le pic pétrolier arrivera un jour, ce n'est pas une théorie, c'est seulement dû au fait que le pétrole est présent en stock limité, donc l'exploitation passera par un maximum avant de décliner. La question est de savoir quand arrivera le pic et les risques que cela représente pour la société ;
- ✓ Le ratio réserves/production est de 50,7 en 2015, ce qui semble indiquer 50 ans de production au rythme actuel (BP, 2016b). Cependant, cet indicateur est trompeur, c'est avant tout le débit auquel le pétrole peut être sorti de terre à un prix acceptable pour les consommateurs qui importe pour l'économie ;
- ✓ Selon l'optimisme ou le pessimisme des prévisions, le pic pétrolier était évalué entre 2005 et 2040 avant la révolution des hydrocarbures non conventionnels. Il est également probable que le pic corresponde plutôt à un plateau ondulant, caractérisé par des prix chaotiques associés à des cycles de récession économique (Connaissance des énergies, 2016a), cycles qui semblent déjà caractériser la période actuelle selon le schéma suggéré ci-dessous (dans Avenir sans pétrole, 2014 ; Figure 10) ;
- ✓ Par ailleurs, une production constante signifie très certainement un approvisionnement décroissant pour l'Europe, étant donné la consommation croissante des pays producteurs et des pays émergents et en développement ;

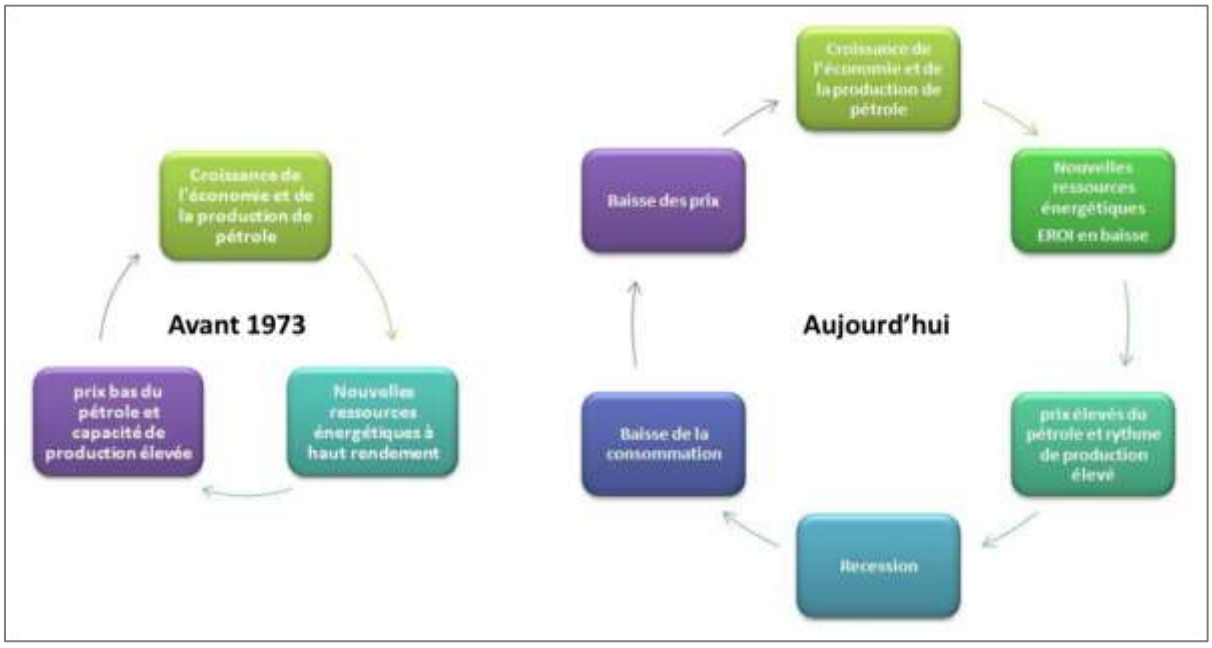


Figure 10 : Schéma de l'interdépendance entre la croissance économique, la consommation de pétrole et son prix, avant les chocs pétroliers (à gauche) et aujourd'hui (à droite ; repris d'après Avenir sans pétrole, 2014)

- ✓ Les réserves actuellement exploitées ont une part de plus en plus importante de pétrole non conventionnel, qui a des coûts de production plus élevé (Figure 11), présageant plutôt une tendance haussière des prix du pétrole sur le long terme. Leur rendement énergétique (EROI : energy return on investment) est également en baisse, ce qui signifie une énergie nette pour la société plus difficile à faire croître (CEC, 2015). Par ailleurs, les réserves non conventionnelles sont aussi plus gourmandes en métaux pour leur exploitation et ont des impacts plus forts sur leur environnement ;
- ✓ Enfin, il faut noter que ce qui est avant tout important pour la croissance de l'économie n'est pas le prix du pétrole mais la quantité consommée. Le prix influence la demande par le choix des consommateurs, et il influence aussi l'offre par les investissements dans l'exploration & production. Il a donc un impact indirect sur le PIB, via l'influence sur la quantité demandée et offerte. Mais le prix du pétrole ne répond pas parfaitement à la loi de l'offre et de la demande, étant donné notamment les cartels de producteurs, les contraintes géopolitiques, techniques, ou encore la spéculation financière. Son influence est donc indirecte ce qui explique que son évolution ne soit pas directement corrélée à la croissance du PIB, contrairement à la quantité consommée de pétrole et plus globalement d'énergie.

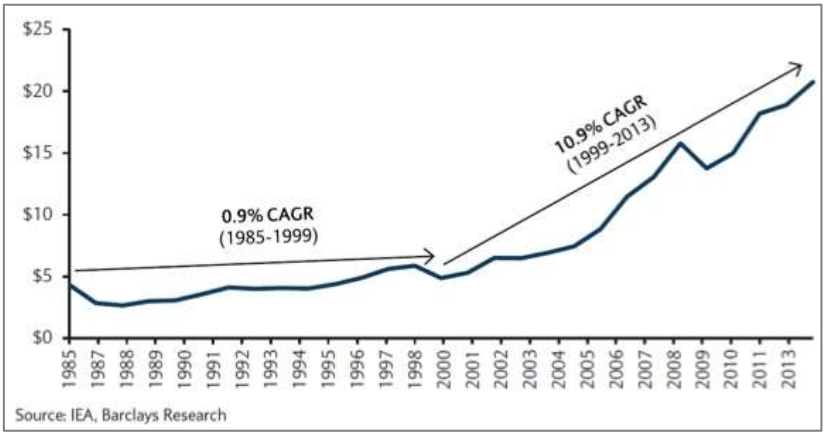


Figure 11 : CAPEX (dépenses d'investissement) en exploration & production par baril entre 1985 et 2013 (Our Finite World, 2015b)

Ainsi, les éléments précédents indiquent qu'il y a déjà assez de contraintes (CO_2, géopolitiques, balance commerciale, pollutions, impacts sur économie, etc.) sur l'énergie et notamment sur le pétrole pour sortir de cette dépendance. Les incertitudes sur de nombreuses questions sont encore nombreuses étant donné le peu de recherches notamment sur le lien entre énergie et économie (pour plus d'informations, voir notamment le programme du dernier séminaire de la Chaire Energie et Prospérité, 2016).

L'objectif était ici de pointer l'existence d'un lien trop souvent oublié, comme le note une analyse récente de Natixis sur l'influence du prix du pétrole dans les évolutions économiques : « Nous pensons que les variations du prix du pétrole ont un pouvoir explicatif très important des cycles économiques, des crises, des évolutions de la croissance, et qu'on sous-estime ce pouvoir explicatif par rapport à celui des politiques budgétaires, fiscales, monétaires, salariales, de change... » (Natixis, 2016).

Cette dépendance de l'économie à l'énergie renforce un peu plus l'exigence d'engager au plus vite la transition énergétique, et notamment dans les transports qui sont très dépendants au pétrole, comme nous allons le voir.

1.2.2.4. Les transports largement dépendants du pétrole

Les transports sont de loin le secteur le plus dépendant au pétrole. Dans le monde, 94% de la consommation d'énergie des transports vient du pétrole, loin devant les biocarburants pour environ 2%, l'électricité 1%, et le gaz et autres carburants pour 3% (IPCC, 2014c). En effet, la quasi-totalité des transports routiers fonctionnent avec du pétrole, tout comme les transports aériens, maritimes et fluviaux. Seuls les transports ferroviaires fonctionnent en bonne partie à l'électricité. Ainsi, les transports représentent 63,8% de la consommation de pétrole dans le monde en 2013, part qui a augmenté depuis 1973 (45,4% ; IEA, 2015).

Au niveau français, la répartition change relativement peu, avec 91,4% de pétrole, 6,1% d'énergies renouvelables (principalement les biocarburants), 2,3% d'électricité et 0,2% de gaz en 2014 (ADEME, 2016a). Par ailleurs, les transports sont le deuxième secteur le plus consommateur d'énergie en France derrière le bâtiment, avec 33% de la consommation d'énergie finale (MEEM, 2016a). En raison du mix énergétique fortement carboné pour les transports, les émissions des transports représentent un peu plus de 40% des émissions liées à l'énergie (et 28% des émissions totales de GES ; MEDDE, 2015a).

Il est donc possible de comprendre aussi la dépendance de l'économie au pétrole par les transports. En effet, le lien entre la croissance économique et la demande de transport est clairement établi, aussi bien au niveau français que mondial (Quinet, 1998 ; IPCC, 2014a). Etant donné que les transports sont dépendants du pétrole, l'économie est ici indirectement dépendante du pétrole, via l'augmentation des besoins de transport des biens et des voyageurs (et donc de la consommation de pétrole) liés à la croissance économique.

Par ailleurs, dans de nombreux pays développés, il a été observé ces dernières années un fort ralentissement voire un plafonnement puis une baisse de l'usage de la voiture (le *peak car*). Cela s'étend même à l'ensemble des déplacements pour certains pays (ITF, 2012). Les causes de ces tendances sont nombreuses et leur part relative difficile à évaluer, mais il apparait que l'augmentation du prix du pétrole est l'explication de nature économique la plus fréquente dans la littérature (Sétra, 2013).

De même, une enquête réalisée en 2010 demandait « Pour quelle(s) raison(s) principale(s) avez-vous renoncé, réduit ou envisagé de réduire l'usage de la / votre voiture ? ». L'argument le plus cité était le prix des carburants (51%), loin devant les autres explications de respect de l'environnement (30%) et les problèmes de stationnement (21% ; Certu, 2012).

Ainsi, un des enjeux de la mobilité est de réussir à réduire la dépendance au pétrole, par de plus faibles consommations énergétiques et/ou une substitution de l'énergie utilisée.

Cependant, toute substitution devra s'assurer de ne pas créer une dépendance à d'autres types de ressources non renouvelables ou ayant de forts impacts sociaux ou environnementaux : concurrence des biocarburants avec les usages alimentaires des cultures, dépendance aux ressources minérales pour les nouvelles technologies comme les batteries de véhicules électriques (lithium, terres rares, etc.), ou encore production électrique supplémentaire liée au transfert vers la mobilité électrique.

1.2.3. Les autres externalités des transports

Pour rappel, une externalité caractérise le fait qu'un acteur économique crée, par son activité (ici son transport), un effet externe en procurant à autrui, une utilité ou au contraire une désutilité, sans contrepartie monétaire.

L'intérêt de l'étude des externalités des transports est notamment de pouvoir évaluer leur coût économique lorsque cela est possible. Ce chiffrage nécessite de monétariser des coûts (externalités négatives) et des bénéfices (externalités positives) qui sont souvent non monétaires, comme par exemple le chiffrage de l'émission d'une tonne de CO_2, de pertes sur la biodiversité, ou des impacts sur la santé ou la qualité de vie.

Le CGDD a ainsi des valeurs de référence pour certaines de ces externalités, parmi les plus importantes pour les transports et les plus faciles à monétariser. Les valeurs des externalités sont différenciées entre transport de passagers et transport de marchandises, selon le mode de transport, et parfois par type de carburant et environnement de circulation (transport urbain, régional, interrégional). La classification utilisée par le CGDD pour les externalités des transports est conservée dans cette partie (CGDD, 2013a). L'exemple est donné dans le Tableau 1 pour le transport urbain de voyageurs :

Tableau 1 : Bilan des externalités et des prélèvements pour le transport urbain (en c€/v-km ; CGDD, 2013a)

	Route (urbain dense)		RER	Transports collectifs urbains		
	VP Essence	VP Diesel	RER	Métro	Tramway	Bus
Environnement	1,79	2,63	0,040	0,050	0,130	1,30 à 2,00
dont CO2	*0,54*	*0,54*	*0,017*	*0,020*	*0,021*	*0,30 à 0,55*
dont pollution locale	*0,59*	*1,43*	*0,021*	*0,025*	*0,026*	*0,80 à 1,00*
dont bruit	*0,65*	*0,65*	*0*	*0*	*0,087*	*0,20 à 0,45*
Insécurité	4,78	4,78	0,350	0,350	0,960	0,70 à 1,35
Congestion	16,75	16,75	-	-	-	4,60 à 6,20
Usage des infrastructures	0,58	0,58	-	-	-	-
Total coûts externes	**23,90**	**24,75**	**0,4**	**0,4**	**1,1**	**7,9 à 8,2**
Prélèvements	**5,15**	**3,53**	**0**	**0**	**0**	**1,2 à 2,2**
BILAN	**-18,75**	**-21,20**	**-0,4**	**-0,4**	**-1,1**	**-5,8 à -7,0**

L'exemple montre un impact important de la congestion routière dans les résultats, tandis que l'avantage est très fortement pour les transports en commun, en particulier les modes ferroviaires. Par ailleurs, les prélèvements (notamment les taxes) sur la voiture ne compensent que très peu ses externalités.

En revanche, ce n'est plus le cas pour les véhicules essence pour le transport régional et interrégional où le bilan est respectivement quasiment à équilibre et positif. La congestion bien moins forte à longue distance équilibre fortement le bilan entre les différents modes de transport.

1.2.3.1. Les externalités environnementales

L'effet de serre : pour les transports, cela concerne les émissions de CO_2, comme cela a été détaillé plus haut. En France, le transport représente 28% des émissions de GES, et 14% dans le monde, participant d'autant à cette externalité environnementale.

Il faut cependant noter un fait important sur la monétarisation du CO_2, dont le montant est de 32 €/tCO_2 en 2010, comme le préconise le rapport Quinet (CAS, 2008). Cette valeur augmente ensuite à 56€ en 2020, 100€ en 2030 jusque 200€ en 2050. Ainsi, la valeur accordée à l'émission d'une tonne de CO_2 est fortement croissante au cours du temps, puisqu'elle est multipliée par 6 en l'espace de 38 ans. Bien que la croissance du prix du CO_2 soit cohérente dans une logique de coût-efficacité à appliquer à la fiscalité, elle est bien moins justifiée pour un chiffrage des externalités, qui devrait plutôt reposer sur un chiffrage au coût marginal de l'externalité. On pourrait même arguer que physiquement, une tonne de CO_2 émise aujourd'hui a plus d'impact sur le système climatique qu'une tonne émise en 2050, étant donné que son impact sur l'effet de serre sera plus long. Avec une valeur calculée sur le coût marginal, la valeur du CO_2 serait sûrement supérieure à 32€ et pourrait modifier fortement certains bilans calculés par le CGDD.

Les pollutions locales de l'air : la problématique devient de plus en plus importante en France. Notamment dans les consciences, puisque la pollution de l'air est placée juste derrière le changement climatique parmi les dégradations environnementales les plus préoccupantes pour les Français, et cette perception est en augmentation ces dernières années (CGDD, 2016a).

En termes de santé publique, les études pointant les impacts sur la santé de la pollution et ses coûts sanitaires se multiplient. Une récente étude montre que plus de 48 000 décès par an pourraient être évités sans pollution anthropique aux PM2,5 (les particules fines au diamètre inférieur à 2,5 micromètres), et les personnes de 30 ans gagneraient en moyenne 9 mois d'espérance de vie dans cette scénario (Santé publique France, 2016).

Pourtant les PM2,5 ne sont qu'un des polluants atmosphériques impactant la santé. Il est possible de citer également les PM10 (particules fines inférieurs à 10 micromètres), l'ozone (O_3), les oxydes d'azote (NOx), le dioxyde de soufre (SO_2), les composés organiques volatils (COV) ou encore les métaux lourds, chacun ayant leurs propres sources d'émissions et des impacts différents sur la santé (Airparif, 2016a).

Concernant les sources d'émissions, le trafic routier représente souvent une part importante, avec les chiffres suivants pour l'Île de France : 56% des émissions de NOx, 35% des PM2,5, 28% des PM10, 14% des COV non méthaniques et 1% du SO_2 (AirParif, 2016b). Ces pourcentages sont en général plus forts encore dans Paris, où la pollution routière est plus concentrée. Les principaux impacts sur la santé concernent les maladies respiratoires, les pathologies cardiaques et les cancers du poumon.

Le coût total de la pollution de l'air pour la France s'établit entre 68 et 97 milliards d'euros par an (correspondant pour beaucoup à la monétarisation des vies humaines et des années de vie perdues pour problèmes de santé), auquel s'ajoute à minima 4,3 Mds € de coût non sanitaire. Le coût pour les régimes obligatoires de la sécurité sociale est de 3 Mds €, et le bénéfice net de la lutte contre la pollution de l'air serait de 11 Mds € par an (Sénat, 2015).

Les nuisances sonores : en France, le bruit des transports affecte la majorité de la population, en premier lieu à cause du trafic routier (52 millions de personnes avec des niveaux supérieurs à 42dB(A)), puis du trafic ferroviaire (6 millions) et enfin aérien (4 millions). Les niveaux sonores sont très variables, mais ce sont près de 9 millions de Français qui sont fortement exposés au bruit des transports, c'est-à-dire avec des niveaux dépassant les 65 dB, dont 7 millions pour le trafic routier et 1 million pour le trafic ferroviaire.

Le coût sur la santé s'élève à 11,5 milliards d'euros par an en France, dont 89% est dû au trafic routier, 9% au trafic ferroviaire et 2% à l'aérien. Cela correspond aux coûts sanitaires de la gêne, des troubles du sommeil et autres effets du bruit sur la santé. D'autres conséquences du bruit des transports d'un montant supérieur à 9 milliards d'euros n'ont pas pu être évaluées précisément, elles correspondent notamment à la perte de valeur immobilière (près de 7,1 Mds € de décote annuelle sur le parc immobilier résidentiel), aux pertes de productivité au travail et aux troubles de l'apprentissage (environ 2 Mds € les deux réunis ; ADEME et CNB, 2016).

Au-delà de ces impacts qui peuvent se chiffrer avec plus ou moins de précision, le bruit peut fortement affecter la qualité de vie. L'étude pointe d'ailleurs la nécessité de réduire fortement le bruit en ville dans une perspective de densification de celle-ci, afin d'éviter une forte augmentation de cette externalité.

L'effet de serre, la pollution atmosphérique et le bruit sont les externalités environnementales des transports les plus citées et les plus souvent monétarisées.

Par ailleurs, il a été considéré que la **consommation de ressources épuisables** étudiée dans la partie précédente correspond à une externalité négative. En effet, elle empêche les autres acteurs économiques présents ou futurs de bénéficier de ces ressources (puisque c'est un bien rival), sans pour autant payer pour la rareté créée : aucune rente de rareté n'est redistribuée aux autres acteurs qui auraient pu profiter de cette ressource.

Le CGDD ne relève pas la consommation de ressources épuisables, mais cite les externalités environnementales suivantes (CGDD, 2013a) :

- ✓ **Les pollutions de l'eau et des sols**, liées aux rejets polluants des circulations motorisées et des travaux d'infrastructures de transport ;
- ✓ **Les effets de coupure des infrastructures sur la biodiversité**, par exemple les autoroutes ou les lignes à grande vitesse qui ont un impact sur la biodiversité et peuvent fragmenter les habitats naturels ;
- ✓ **La consommation d'espaces et l'artificialisation des sols** par les infrastructures de transport, dont le développement peut favoriser indirectement l'étalement urbain ;
- ✓ **Les risques technologiques** et de **sûreté** liés au transport de matières premières dangereuses ;
- ✓ **Les paysages et le patrimoine**, via l'impact visuel des infrastructures et les possibles destructions de patrimoine que leur construction peut engendrer ;
- ✓ **Les vibrations**, lors de la construction d'une infrastructure ou de son utilisation, qui peut endommager des habitats potentiels, perturber des écosystèmes ou entrainer des nuisances pour les riverains.

1.2.3.2. Les externalités sociales

L'étude du CGDD relève 4 types d'externalités sociales des transports, qui ne font pas toutes l'objet de monétarisations en raison de la difficulté de l'exercice pour certaines d'entre elles (CGDD, 2013a) :

- ✓ **L'insécurité** des modes de transport, liée à l'accidentologie, qui fait parfois l'objet de monétarisations (voir Tableau 1). En effet, tous les coûts ne sont pas forcément supportés par l'usager, et notamment la douleur et les souffrances imposées aux tiers, les pertes de production et les pertes de vies humaines constituent des externalités ;
- ✓ **La morbidité**, qui regroupe principalement les impacts négatifs et positifs sur la santé, dont les impacts négatifs du bruit et de la pollution qui ont été détaillés plus haut. Par ailleurs, les modes actifs que sont le vélo et la marche ont au contraire des effets positifs sur la santé. Leur pratique permet de réduire la sédentarité, alors que l'OMS classe l'inactivité physique comme quatrième facteur de mortalité, responsable de 6% des décès dans le monde (PASS, 2016). Différentes études soulignent les bienfaits de l'activité physique dans l'allongement de la durée de vie, et dans la réduction de la probabilité d'être atteint de maladies cardio-vasculaires, d'obésité ou encore de certains cancers. Il n'est cependant par clair dans quelle proportion cet effet est déjà internalisé par les usagers du vélo et de la marche.
- ✓ **Les effets de coupure sociale et la consommation d'espaces en milieu urbain**, liés aux changements d'accessibilité des activités de proximité ou à longue distance, et à la concurrence des transports avec les autres usages possibles de l'espace public ;
- ✓ **La qualité du cadre de vie et l'attractivité** d'un territoire ou d'un espace de vie, qui peut être améliorée ou dégradée par l'organisation des transports et ses impacts sur l'environnement immédiat.

1.2.3.3. Les externalités économiques

Enfin, les externalités économiques des transports relevées par le CGDD sont les suivantes (CGDD, 2013a) :

- ✓ **L'usure des infrastructures**, qui bénéficie de valeurs de référence du CGDD (voir Tableau 1), calculées comme le coût marginal de l'utilisation d'un mode de transport sur l'entretien et la réparation d'une infrastructure. Ce coût est en effet que très partiellement pris en charge par les usagers du mode en question ;
- ✓ **Les bénéfices économiques élargis** qui correspondent aux externalités positives générées par un mode de transport sur la localisation des entreprises, leur proximité avec les aménités et services publics, ou l'amélioration de leurs conditions de concurrence. Cette notion très large concerne également le développement de l'emploi et de l'économie locale permise par les modes de transport ;
- ✓ **La congestion**, qui représente des valeurs d'externalités très fortes en milieu urbain (voir Tableau 1), alors que cette externalité est considérée comme nulle sur les routes communales. Pour le mode routier, son coût marginal est calculé comme une valorisation monétaire du temps perdu par les usagers lors de l'arrivée d'un nouveau véhicule sur la route.

2. Les scénarios de prospective sur le facteur 4 dans les transports

2.1. Objectifs et méthodologie de la comparaison des scénarios

De nombreux **scénarios de prévision et de prospectives** sur la transition énergétique et/ou les transports existent à l'horizon 2050 pour la France. L'objectif de cette étude est de réaliser une comparaison de ces scénarios, à la fois sur leur mode de construction, leurs hypothèses, les mesures déployées, leurs résultats et les éventuels enseignements à en tirer pour la recherche ou les politiques publiques.

Comme indiqué dans l'avant-propos, la comparaison des scénarios permet également ici de construire une nouvelle typologie pour les scénarios de transition énergétique dans les transports. Un accent particulier sera mis sur la comparaison et l'analyse des leviers identifiés dans les scénarios pour atteindre le facteur 4, et ils constitueront d'ailleurs un critère important de la typologie créée.

Enfin, il est important de souligner l'importance d'une telle comparaison pour comprendre la diversité des approches et trajectoires possibles. France Stratégie soulignait ainsi parmi les conclusions de sa comparaison des études macroéconomiques de la transition énergétique, analyse qui peut aussi s'appliquer aux scénarios de transition énergétique dans les transports (France Stratégie, 2015) : « il y a à l'heure actuelle trop d'incertitudes pour analyser la dimension macroéconomique de la transition énergétique et des politiques d'accompagnement en s'appuyant sur un seul modèle. C'est l'utilisation conjointe de plusieurs modèles qui permet d'encadrer le champ des possibles, notamment en termes de possibilité de substitution énergétique et de représentation du progrès technique. Cette utilisation de plusieurs modèles permet aussi de distinguer les politiques d'accompagnement à mettre en œuvre dans tous les cas, de celles qui dépendent davantage de l'apparition (ou non) de nouvelles technologies et de leur rentabilité. »

Les **29 scénarios** étudiés proviennent de **13 publications** qui sont pour la plupart publiques et disponibles en ligne (voir Tableau 2 et bibliographie pour les références). Les auteurs des scénarios sont à la fois des organismes de l'Etat (CGDD, DGEC, ADEME), des organismes de recherche (ANCRE, Enerdata et LET, CIRED), des entreprises (SNCF, GrDF) ou des associations (Négatep, négaWatt, Greenpeace, RAC). De nombreux auteurs et organismes partenaires sont souvent associés à ces études.

Les études ont été publiées entre 2006 et 2016, avec une très grande majorité (11 sur 13) datant de moins de 5 ans, permettant plus facilement la prise en compte des derniers résultats de la recherche et les évolutions récentes du contexte économique, énergétique et des systèmes de transport.

De nombreux autres scénarios existent, en général ils n'ont pas été étudiés dans le cadre de cette analyse car trop anciens, limités au secteur électrique (mix 100% électrique de l'ADEME, RTE, Areva), pas assez détaillés pour le secteur des transports (UFE, rapport du Comité de Perthuis), avec un horizon différent de 2050 (scénarios du CEA, Global Chance), ou encore avec un périmètre géographique européen ou mondial (Commission Européenne, WWF).

Tableau 2 : Liste et périmètre des 13 publications et 29 scénarios étudiés

Scénarios		Périmètre	
Publication	**Nom du scénario**	**Sectoriel**	**Temporel**
CGDD, 2016	Tendanciel	Transport	2012-2050
	Volontariste SNBC		
DGEC, 2014-15	AME 2035	Energie	2010-2035
	AMS2 2035		
SNCF, 2015	Ultramobilité	Voyageurs	2013-2050
	Altermobilité		
	Proximobilité		
Voyages SNCF, LD (longue distance)**, 2015**	Tendanciel	Voyageurs LD	2013-2050
	Catastrophe économique		
	Société fondée sur la sobriété		
	Nouvelle gouvernance européenne		
	Innovations technologiques		
Négatep, 2014	Négatep	Energie	2012-2050
NégaWatt, 2011-2013	NégaWatt 2050	Energie	2010-2050
ADEME, 2014	Vision ADEME 2050	Energie	2010-2050
ANCRE, 2013	Tendanciel	Energie	2010-2050
	Sobriété renforcée SOB		
	Décarbonation par l'électricité ELE		
	Vecteurs diversifiés DIV		
GrDF, 2013	GrDF 2050	Energie	2010-2050
Greenpeace, 2013	Scénario de transition énergétique	Energie	2011-2050
CIRED et RAC, 2012	Scénario bas carbone acceptable	Energie	2010-2050
PREDIT 3 (Enerdata-LET), 2008	Pégase	Transport	2000-2050
	Chronos		
	Hestia		
CGPC, 2006	Gouv. mondiale et industrie env	Transport	2002-2050
	Repli européen et déclin		
	Grande Europe économique		
	Gouv. européenne et régionalisation		

Les éléments suivants ont pour but de présenter les principales caractéristiques qui ont été analysées, les différences d'approches et de périmètres entre les scénarios ou encore les unités utilisées, comme autant de clés facilitant la lecture comparative des scénarios.

Ensuite, la typologie créée est présentée, et les scénarios sont résumés afin d'en comprendre la logique et expliquer leur classement. De même, le plan des fiches-résumées des publications est présenté, fiches qui peuvent être consultées en annexe (p 117 à 151).

Enfin, les principaux résultats des scénarios sont comparés à l'aide notamment de tableaux et figures synthétiques. L'analyse des mesures permettant d'atteindre le facteur 4 sera présenté dans le 3ème chapitre de l'étude.

2.1.1. Des scénarios aux logiques très variées

2.1.1.1. Les modèles économiques et techniques

Les modèles utilisés pour la réalisation des scénarios sont très rarement détaillés. Ainsi, les équations utilisées, la manière de représenter les différentes hypothèses dans le modèle et ainsi leur impact sur les résultats sont difficiles à apprécier.

Il est toutefois possible de trouver des informations plus ou moins détaillées sur les modèles suivants : le modèle Imaclim utilisé dans la publication du CIRED-RAC ; les modèles Med-Pro et ThreeME de l'ADEME ; les modèles Med-Pro, POLES, NEMESIS et Threeme utilisés par la DGEC. Les modèles utilisés sont souvent des modèles technico-économiques, qui permettent ainsi de concilier une analyse des secteurs énergétiques et de leurs flux et contraintes techniques, avec une analyse des mécanismes économiques en jeu. Pour les scénarios de l'ADEME et de la DGEC, il semble également que l'analyse des impacts macroéconomiques des scénarios a été réalisée indépendamment de la modélisation initiale des scénarios de transition énergétique. Pour sa part, le scénario négaWatt est purement physique, et il n'y a par exemple pas d'hypothèse de croissance économique contrairement à la majorité des autres modèles. Concernant les autres publications, les informations sur les modèles utilisés sont inexistantes ou très sommaires.

2.1.1.2. Scénarios exploratoires et normatifs

Comme le remarque Carbone 4 dans son étude des quatre trajectoires du débat national sur la transition énergétique (DNTE), une différence majeure entre les scénarios concerne l'objectif auquel ils cherchent à répondre (Carbone 4, 2014) :

- ✓ Les scénarios **exploratoires** ne fixent pas de « résultats a priori », mais étudient l'impact attendu d'un ensemble d'actions à partir d'une situation présente ;
- ✓ Les scénarios **normatifs**, au contraire, définissent un futur possible et souhaitable à un horizon donné, comme par exemple celui d'atteindre le facteur 4 en 2050 dans notre cas. Le résultat final est donc déjà connu, le but de l'exercice étant de définir les actions et éventuellement la trajectoire permettant de l'atteindre.

Les scénarios du CGDD, du CIRED-RAC et la vision 2030 de l'ADEME notamment sont dans une logique exploratoire, tandis que les scénarios Négatep, négaWatt, de l'ANCRE ou la vision 2050 de l'ADEME sont normatifs, avec l'atteinte du facteur 4 comme objectif.

La DGEC va plus loin dans la classification avec différentes approches qui sont parfois combinées dans un même exercice de scénarisation : les scénarios de « story telling » donnant une vision de l'avenir avec peu de modélisation ; les scénarios de « back-casting » dans la même logique que les scénarios normatifs ; les scénarios de simulation s'appuyant sur des modèles mathématiques capables entre autres d'assurer une cohérence technico-économique ; et enfin les scénarios d'optimisation destinés à mettre en évidence une trajectoire optimale sous certains critères et contraintes (DGEC, 2014).

Enfin, certains scénarios se veulent plutôt de la prévision du futur, souhaitant ainsi se rapprocher au maximum de la réalité, tandis que les exercices de prospectives sont plutôt orientés vers des futurs possibles visant à éclairer les conséquences possibles de choix actuels. Parfois par abus de langage, il sera généralement question des scénarios de prospectives dans ce rapport, la majorité des publications étudiées se situant dans cette logique.

2.1.1.3. Scénarios tendanciels et volontaristes

Dans la majorité des publications, un scénario tendanciel sert de référence à la comparaison avec un ou plusieurs scénarios volontaristes concernant la transition énergétique dans les transports. C'est le cas dans les publications du CGDD, de la DGEC, de Voyages SNCF, et de l'ANCRE. Les scénarios tendanciels n'ont pas été retenus pour les études de Négatep, négaWatt, CIRED-RAC et Greenpeace, les résultats n'étant que très peu restitués.

Pour leur part, les scénarios de l'ADEME et de GrDF ne présentent qu'une trajectoire de transition énergétique sans scénario tendanciel.

Enfin, certains scénarios des études de Voyages SNCF et du CGPC ne sont ni tendanciels ni volontaristes, mais correspondent à des évolutions en rupture avec les tendances historiques, sans pour autant aller dans le sens de la transition énergétique (exemple des scénarios de catastrophe économique).

2.1.1.4. Les paramètres clés différenciant les scénarios

Comme cela a été vu, de nombreuses publications étudient un scénario volontariste, parfois en comparaison à un scénario tendanciel. Ces scénarios volontaristes font ainsi des hypothèses sur des mesures politiques ambitieuses (fiscales, réglementaires, investissements), sur des évolutions voire des ruptures technologiques, et sur des changements dans l'organisation de la société ou dans les comportements.

Dans le cas où plusieurs scénarios volontaristes sont identifiés, les paramètres qui permettent de différencier ces avenirs possibles sont très variables selon les études :

- ✓ Les paramètres clés concernent les évolutions du contexte économique, géopolitique et du niveau de gouvernance aux niveaux européen et mondial pour la publication du CGPC ;
- ✓ Les évolutions contrastées considèrent des scénarios où le facteur de rupture concerne soit le contexte économique, technologique, la gouvernance ou les préférences de la société, pour l'étude de la SNCF sur la mobilité longue distance ;
- ✓ Essentiellement les choix et les innovations technologiques pour les scénarios de l'ANCRE ;
- ✓ Les aspirations des voyageurs pour l'étude facteur 4 de la SNCF, en se basant notamment sur une enquête sociologique réalisée en amont de l'étude ;
- ✓ Les vitesses de transport et les budgets temps de transport (BTT) pour le transport de voyageurs, dans l'étude d'Enerdata-LET.

Les précédents exemples illustrent également le fait que selon les études, les principales évolutions qui différencient les scénarios entre eux peuvent être exogènes (croissance économique, gouvernance, etc.) ou endogènes (politiques publiques, technologie ou changements de comportements) au système de transport, critère qui sera retenu dans la typologie des scénarios créée.

Ces approches très différentes ne facilitent pas forcément la comparaison des études entre elles, cependant des points de convergence peuvent être observés. C'est notamment le cas des tendances vers une société fondée sur la sobriété ou les promesses de ruptures technologiques importantes, qui sont souvent évoquées parmi les scénarios contrastés.

2.1.2. Les périmètres des scénarios

La comparaison de scénarios de transition énergétique se heurte à des difficultés techniques, et en particulier celle des périmètres d'analyse des scénarios, qui ne sont pas uniformisés selon les exercices de prospectives réalisés (Carbone 4, 2014).

Ainsi, dans le cadre du DNTE, l'étude de Carbone 4 sur les 4 trajectoires de transition énergétique prend les précautions nécessaires pour uniformiser les périmètres et ainsi pouvoir rendre les résultats directement comparables entre eux. Bien qu'idéale, cette approche est assez difficile à réaliser et les données peuvent rapidement manquer. Dans cette étude, en raison du grand nombre de scénarios étudiés et ainsi de la difficulté à corriger toutes les différences de périmètres, il a plutôt été choisi d'utiliser les résultats bruts présents dans les études et de détailler les différences de paramètres afin de pouvoir évaluer quels résultats sont comparables ou non. Cette introduction présente les principales différences entre les scénarios. Dans la suite du rapport, les écarts entre les scénarios sont détaillés lorsque cela est nécessaire pour la compréhension des données, figures et tableaux.

Enfin, ces différences de périmètres invitent aussi le lecteur à considérer les chiffres avec précaution, et les différents résultats sont en général plutôt à prendre comme des ordres de grandeur. De même, le travail de comparaison insiste sur les évolutions des différents paramètres (en pourcentage entre l'année de référence et l'année de projection), afin de repérer les grandes tendances.

2.1.2.1. Le périmètre sectoriel des études

Comme indiqué dans le Tableau 2, le périmètre sectoriel varie selon les études. Une bonne partie des études correspond à des scénarios de **transition énergétique**, c'est-à-dire qui regroupent l'ensemble des secteurs énergétiques, dont le transport mais aussi le bâtiment, l'industrie, et les consommations énergétiques de l'agriculture. Ce périmètre correspond à peu près aux émissions de CO_2 françaises hors UTCF, c'est-à-dire les émissions dues à la combustion d'énergie carbonée (pétrole, gaz, charbon).

L'étude de l'ADEME concerne plus globalement les émissions de GES, donc intègre en plus du CO_2 les émissions de méthane (CH_4) et de protoxyde d'azote (N_20), qui sont principalement issues de l'agriculture, des déchets, et des procédés industriels. Cependant cela ne change rien sur les émissions du transport dont seules les émissions de CO_2 sont comptées.

Enfin, 5 études présentent des scénarios qui se concentrent sur le secteur des **transports** uniquement : transports de marchandises et de voyageurs pour les études du CGDD, d'Enerdata-LET et du CGPC ; transport de voyageurs uniquement pour l'étude facteur 4 de la SNCF (SNCF, 2015a) ; et voyageurs longue distance uniquement pour l'autre étude de la SNCF (SNCF, 2015b).

Une différence importante sur les transports concerne la prise en compte de l'aviation internationale. La seule étude qui la prend en compte est le scénario négaWatt, qui a donc une part modale de l'avion artificiellement plus forte que pour les autres scénarios. L'intégration de ces déplacements devrait en réalité être faite si l'objectif est d'avoir une vision de l'empreinte carbone des Français, au vu de son importance dans les parts modales et les émissions, et de sa forte croissance actuelle. Dans le scénario négaWatt, l'avion représente 273 Mds v-km (23,2% du total), contre environ 15 Mds v-km (1,5%) pour les seuls

déplacements intérieurs en avion. Les implications en termes d'émissions sont bien évidemment très importantes aussi, l'avion étant le mode de transport le plus émetteur par voyageur-kilomètre (144,6 gCO_2/v-km contre 85,5 pour les voitures particulières et 3,4 pour le TGV, pour les distances nationales ; ADEME, 2016a).

Par contre, même pour le scénario négaWatt, le transport maritime international n'est intégré dans aucun des scénarios.

2.1.2.2. Les périmètres géographiques et temporels

Le choix a été réalisé de se concentrer sur les études ayant comme **périmètre géographique** la France. La population prise en compte se limite en général à la France Métropolitaine quand ce détail est donné, mais les DOM-COM sont aussi intégrés dans la publication de Greenpeace, et la DGEC intègre aussi les DOM.

La population pour l'année de référence est comprise entre 62,2 (négaWatt) et 65,5 millions d'habitants (DGEC) suivant les études, en raison de ces différences de périmètre et l'année prise en compte.

Le périmètre des émissions retenu est toujours celui des émissions nationales, c'est-à-dire celles de l'approche « Territoire » privilégiée notamment dans les comptabilités internationales de la CCNUCC (Convention cadre des nations unies sur le changement climatique) et donc des négociations internationales sur le climat. Cette approche ne retient que les émissions là où elles sont émises, alors que l'approche « Empreinte » comptabilise les émissions de la demande finale intérieure, en ajoutant les émissions des produits importés et en retranchant les émissions des produits fabriqués en France mais exportés. En 2012, les émissions de gaz à effet de serre de l'approche « Territoire » en France étaient de 460 $MteqCO_2$, tandis que les émissions de l'approche « Empreinte » étaient de 666 $MteqCO_2$, soit 45 % de plus (MEDDE, 2015a). Cependant, il faut noter que cette différence de périmètre ne concerne que très peu le domaine des transports, à condition de prendre en compte les émissions internationales, comme suggéré ci-dessus.

Pour l'**horizon temporel**, seule l'étude de la DGEC a un horizon différent de 2050, en l'occurrence 2035. L'étude a été retenue en raison de sa publication récente et étant donné qu'elle correspond au scénario qui fait référence pour le ministère de l'environnement.

En réalité, les principales différences se situent plutôt sur l'année de référence, en général située autour de l'année 2010, mais fluctuant de l'année 2000 pour l'étude d'Enerdata-LET à 2013 pour l'étude de la SNCF. Cela a un impact essentiellement sur les valeurs des paramètres initiaux : en effet, entre 2000 et 2014, la population a cru de 8,7% (passant de 58,9 à 64,0 millions d'habitants environ ; INSEE, 2016a), la croissance économique réelle de 16,8% (INSEE, 2016b), le transport intérieur de voyageurs de 12% (de 893 à 1000 v-km ; CGDD, 2016) et les émissions associées à l'ensemble des transports ont décru d'environ 5% (CGDD, 2016b).

De même, il faut garder en mémoire ces différences d'année de référence concernant les évolutions cumulées en pourcentage entre l'année de référence et 2050. Ainsi, un taux de croissance de 2% par an entraine une augmentation cumulée de +169% entre 2000 et 2050, et seulement +112% entre 2012 et 2050 (et respectivement +64% et +46% pour une croissance de 1% par an).

2.1.2.3. Les sources statistiques pour le paramétrage du modèle

Les sources statistiques pour les données de départ ou les projections sont rarement données. Cependant certaines différences de valeurs de départ pour une même année permettent d'observer des écarts de périmètre ou des sources statistiques différentes :

- ✓ Concernant la population, ce sont les prévisions de l'INSEE qui sont utilisées. Les prévisions ont très sûrement été revues à la hausse à la fin des années 2000, au vu des écarts constatés sur les niveaux de population en 2050 selon la date des études ;
- ✓ Pour la croissance économique, ce sont souvent des projections des instituts proches de l'Etat (BIPE, CAS, COR, Commission européenne…), quand les taux de croissance ne sont pas décidés directement par les auteurs ;
- ✓ Les prix de l'énergie suivent en général les projections de l'AIE ;
- ✓ Bien que les sources ne soient jamais vraiment citées, il est possible de supposer que les parts modales, les consommations énergétiques et les émissions de CO_2 proviennent des données collectées par le ministère (actuel Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer ; MEEM).

2.1.3. Les unités utilisées

Selon les publications et les références, les unités de demande de mobilité, de consommations énergétiques ou le chiffrage des émissions de GES peuvent différer. Ainsi, les unités utilisées pour la comparaison des scénarios sont les suivantes :

- ✓ L'unité communément utilisée pour le transport de voyageurs est le voyageur-kilomètre (noté **v-km** dans ce rapport), compté en général en milliards de v-km (Mds v-km) étant donné que l'ordre de grandeur des transports intérieurs de voyageurs en France est de 1000 Mds v-km en 2014 (CGDD, 2016). Dans la publication de l'ADEME, ce sont les véhicules-kilomètres qui sont utilisés, nécessitant une conversion en v-km avec le taux d'occupation des véhicules. Les données en v-km ont ainsi été récupérées dans les annexes de la publication de Carbone 4 (Carbone 4, 2014) pour rendre les données comparables. La répartition modale pour l'étude de la DGEC n'a pu être réalisée, en raison des unités différentes, et notamment des millions de passagers pour l'aviation ;
- ✓ Concernant le transport de marchandises, toutes les publications utilisent les tonnes-kilomètres (**t-km**), unité retenue dans ce rapport ;
- ✓ Les consommations énergétiques sont comptées en énergie finale, c'est-à-dire les consommations des vecteurs d'énergie finaux (carburant, électricité, gaz réseau…). Cela ne prend pas en compte les pertes énergétiques dues à la transformation de l'énergie primaire (les sources d'énergie disponibles dans la nature : pétrole, gaz, chaleur produite par l'uranium, éolien, solaire…). Les consommations ont été recalculées en millions de tonnes équivalent pétrole (**Mtep**) pour les études qui comptaient les consommations en térawattheure (TWh ; négaWatt et GrDF) et en pétajoules (PJ ; Greenpeace) ;
- ✓ Les émissions de gaz à effet de serre sont comptées en millions de tonnes de CO_2 (**tCO_2**) ou équivalent CO_2 (et non pas en équivalent carbone ; 1 t eqC = 3,67 t eqCO_2), ce qui n'a pas nécessité de conversion particulière.

2.2. Présentation et typologie des scénarios

2.2.1. La classification utilisée

Il est possible de différencier les scénarios selon de nombreux critères, comme cela a été vu dans la partie précédente : leur périmètre, leur caractère normatif ou exploratoire, tendanciel ou volontariste, ou encore selon que les hypothèses centrales concernent le contexte économique, les technologies ou les aspirations des voyageurs.

La classification proposée ici a pour objectif de pouvoir s'appliquer à l'ensemble des scénarios étudiés, et potentiellement à de futurs scénarios de prospectives sur le domaine des transports. De même, la classification a pour but d'être facilement compréhensible. Les critères utilisés pour différencier les scénarios sont donc les suivants (Figure 12) :

- ✓ Le **caractère tendanciel ou volontariste** des scénarios, concernant la transition énergétique de manière générale et plus précisément dans les transports ;
- ✓ Le **caractère endogène ou exogène au secteur des transports des principales hypothèses** structurantes du scénario : un scénario dont les principales hypothèses sont le contexte économique, géopolitique, la gouvernance ou les évolutions technologiques hors secteur des transports, est classé dans les scénarios aux évolutions « exogènes » aux transports ; les scénarios sont classés dans la catégorie « endogènes » lorsque les principales hypothèses concernent en particulier les politiques publiques, les évolutions techniques et comportementales affectant directement le système de transport ;
- ✓ Enfin, pour les scénarios volontaristes aux évolutions endogènes aux transports, qui sont les scénarios les plus intéressants dans le cadre de cette étude, une différenciation est faite selon que les **leviers utilisés** sont majoritairement politiques, technologiques ou comportementaux.

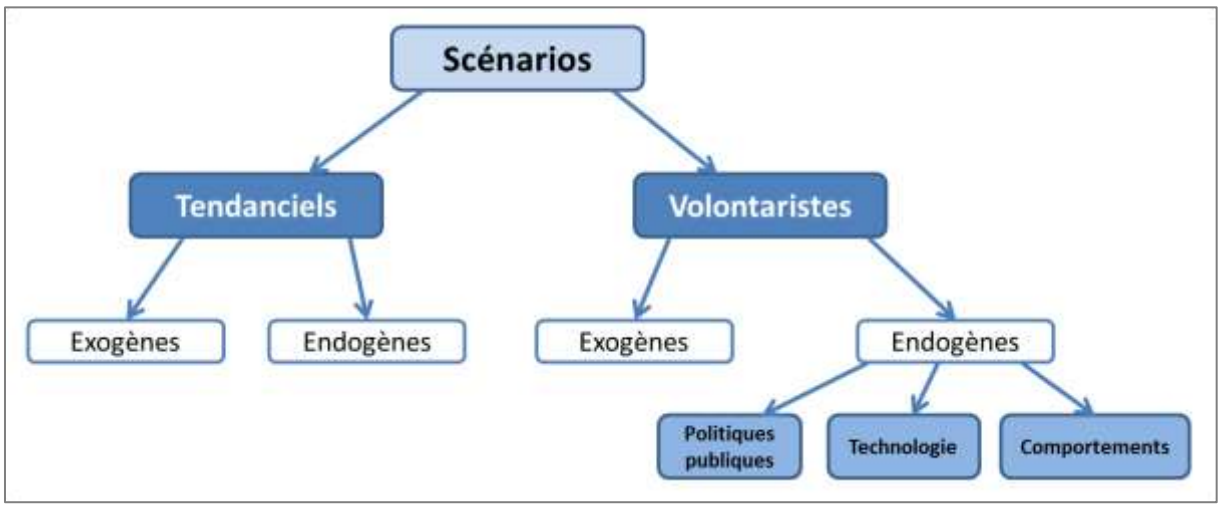


Figure 12 : Critères utilisés pour la classification des scénarios étudiés

La Figure 13 représente la répartition des 29 scénarios selon la classification. Les scénarios en gras sont les scénarios qui représentent bien leur catégorie, les autres ont une classification plus floue et sont parfois à la limite avec une autre catégorie. Le Tableau 3 présente les critères qui ont aidé à la construction de la classification, pour chaque scénario.

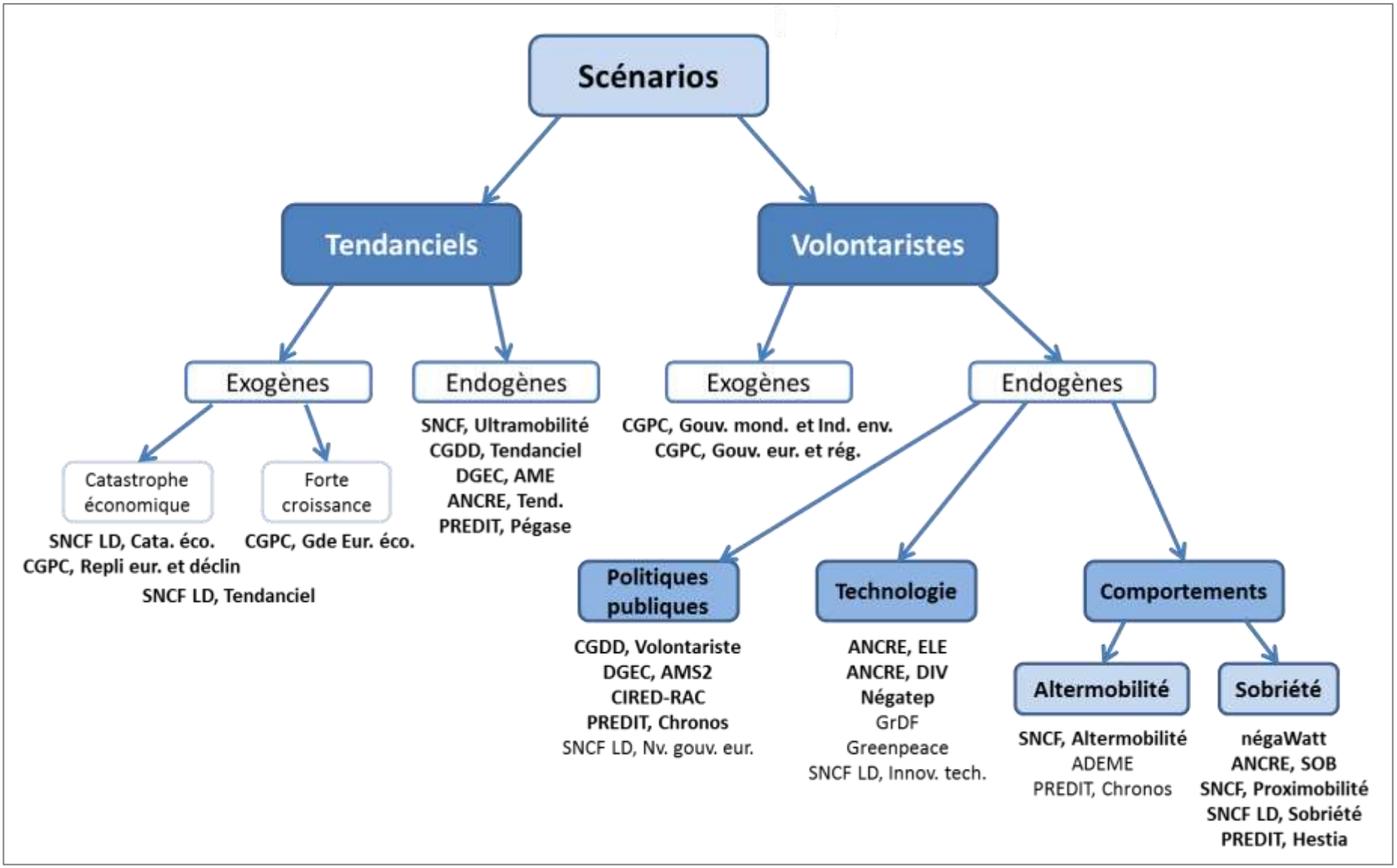


Figure 13 : Classification utilisée pour les 29 scénarios étudiés, selon qu'ils sont tendanciels ou volontaristes, que les évolutions sont endogènes ou exogènes aux transports et selon les principaux leviers utilisés

Tableau 3 : Classification des scénarios selon leur volontarisme sur la transition énergétique dans les transports, le caractère endogène ou exogène au système de transports des principales hypothèses, et les leviers utilisés.

Lecture : plus les couleurs tendent vers le vert, plus les scénarios sont volontaristes sur la transition énergétique dans le domaine des transports.

Scénarios		Périmètre		Emissions	Evolutions dans les transports		Leviers utilisés		
Publication	**Nom du scénario**	**Sectoriel**	**Temporel**	**Atteinte du facteur 4***	**Tendanciel / Volontariste**	**Exogène / Endogène**	**Politiques publiques**	**Technologie**	**Comportements**
CGDD 2016, la demande de transport sur le LT	Tendanciel	Transport	2012-2050	-34%	Tend.	Surtout endo.	Faible	Moyen	Absent
	Volontariste SNBC			-63%	Volont.	Surtout endo.	Fort	Moyen	Faible
DGEC 2014-15	AME 2035	Energie	2010-2035	*-2%*	Tend.	Surtout endo.	Faible	Moyen	Absent
	AMS2 2035			*-40%*	Volont.	Surtout endo.	Fort	Moyen	Faible
SNCF 2015, vers une mobilité sobre en CO2	Ultramobilité	Voyageurs	2013-2050	-46%	Tend.	Surtout endo.	Faible	Faible	Absent
	Altermobilité			-64%	Volont.	Surtout endo.	Moyen	Faible	Moyen
	Proximobilité			-71%	Volont.	Surtout endo.	Moyen	Faible	Fort
SNCF 2015, mobilité longue distance	Tendanciel	Voyageurs LD	2013-2050	-5%	Tend.		Absent	Faible	Absent
	Catastrophe économique			-37%		Surtout exo.	Absent	Absent	Absent
	Société fondée sur la sobriété			-48%	Volont.	Plutôt endo.	Faible	Faible	Fort
	Nouvelle gouvernance européenne			-52%	Volont.		Fort	Faible	Absent
	Innovations technologiques			-10%	Volont.		Absent	Fort	Faible
Négatep 2014	Négatep	Energie	2012-2050		Volont.	Plutôt endo.	Moyen	Fort	Faible
NégaWatt 2011-2013	NégaWatt 2050	Energie	2010-2050	Env -93%	Volont.	Endogène	Moyen	Moyen	Fort
ADEME 2014	Vision ADEME 2050	Energie	2010-2050	-93%	Volont.	Surtout endo.	Moyen	Fort	Fort
ANCRE 2013	Tendanciel	Energie	2010-2050	-31%	Tend.		Faible	Faible	Absent
	Sobriété renforcée SOB			-70%	Volont.	Surtout endo.	Faible	Moyen	Fort
	Décarbonation par l'électricité ELE			-78%	Volont.	Plutôt endo.	Moyen	Fort	Faible
	Vecteurs diversifiés DIV			-78%	Volont.	Plutôt endo.	Moyen	Fort	Faible
GrDF 2013	GrDF 2050	Energie	2010-2050	-76%	Volont.	Surtout endo.	Faible	Fort	Moyen
Greenpeace 2013	Scénario de transition énergétique	Energie	2011-2050	-94%	Volont.	Surtout endo.	Moyen	Fort	Moyen
CIRED et RAC, 2012	Scénario bas carbone acceptable	Energie	2010-2050	-60%	Volont.	Surtout endo.	Fort	Faible	Faible
PREDIT 3 (Enerdata-LET) 2008	Pégase	Transport	2000-2050	-28 à -56%	Tend.	Surtout endo.	Faible	Moyen	Absent
	Chronos			-51 à -74%	Volont.	Surtout endo.	Fort	Moyen	Faible
	Hestia			-60 à -75%	Volont.	Surtout endo.	Moyen	Moyen	Fort
CGPC 2006	Gouv. mondiale et industrie env	Transport	2002-2050	-62%	Volont.	Surtout exo.	Fort	Fort	Absent
	Repli européen et déclin			-19%		Surtout exo.	Absent	Absent	Absent
	Grande Europe économique			-8%		Surtout exo.	Absent	Faible	Absent
	Gouv. européenne et régionalisation			-40%	Volont.	Surtout exo.	Fort	Absent	Moyen

** Chiffres sur la diminution des émissions de CO2 : seulement voyageurs pour étude SNCF, voyageurs longue distance pour SNCF longue distance, et tous transports pour tous les autres scénarios*

Emissions de CO2	*> -30%*	-30 à -60%	-60 à -70%	-70 à -80%	< -80%

2.2.2. Présentation des scénarios et plan des fiches en annexe

Toutes les catégories vont être détaillées dans cette partie, avec un court résumé de chaque scénario, afin notamment de justifier la classification dans leur catégorie et de présenter leurs principaux résultats. Les courtes descriptions se font donc pour chacun des 29 scénarios étudiés, et l'ordre de description des scénarios se fait selon leur catégorie.

A noter qu'une autre description plus détaillée des scénarios est réalisée dans les fiches-résumées en annexe. Elles résument cette fois-ci les 13 publications étudiées, de la plus récente à la plus ancienne, certaines d'entre elles regroupant plusieurs scénarios. Pour faciliter la lecture, les fiches suivent toutes le plan suivant, lorsque les informations et données sont disponibles :

- ✓ Les **auteurs** et le contexte dans lequel a été réalisée l'étude ;
- ✓ Le **périmètre** sectoriel, géographique, et temporel ;
- ✓ Le **modèle** utilisé quand des détails sont fournis sur son fonctionnement ;
- ✓ Le(s) **scénario(s)** avec leur logique et les principales hypothèses ;
- ✓ Les principaux **résultats** des scénarios, concernant : la demande de transport et les parts modales ; les consommations énergétiques ; le Facteur 4 et la réduction des émissions obtenues ;
- ✓ Les **enseignements** pour les politiques publiques et/ou la recherche quand ils sont explicitement détaillés dans l'étude.

2.2.2.1. Les scénarios tendanciels

Les scénarios tendanciels sont essentiellement entendus ici comme les scénarios qui ne sont pas volontaristes concernant la transition énergétique dans le domaine des transports.

2.2.2.1.1. <u>Les évolutions tendancielles exogènes aux transports</u>

Cette catégorie regroupe les scénarios qui ne sont pas volontaristes et dont les évolutions principales sont extérieures au transport. C'est le cas de 4 scénarios étudiés, qui proviennent des études du CGPC et de l'étude de la SNCF sur la mobilité longue distance, pour lesquelles les hypothèses portent majoritairement sur le contexte économique mondial et européen, la géopolitique ou le niveau de gouvernance (CGPC, 2006 ; SNCF, 2015b).

C'est le cas du **scénario tendanciel de l'étude de Voyages SNCF, LD** (longue distance), qui prévoit notamment une croissance plus faible que dans le passé à 0,8% par an, des prix de l'énergie instables en tendance haussière, et une poursuite des progrès technologiques. Ce scénario mène à de très faibles réductions des émissions de CO_2 (-5% entre 2013 et 2050), expliqués par la croissance du trafic de voyageurs (+25%), une baisse de la part de marché du train (de 28 à 21%) et des progrès technologiques limités.

Les 3 autres scénarios de la catégorie ne sont pas volontaristes sur la transition énergétique, mais ne correspondent pas tout à fait non plus à des scénarios tendanciels puisqu'ils supposent une rupture sur la croissance économique.

En effet, un des scénarios contrastés de **Voyages SNCF** correspond à un contexte de **catastrophe économique**, l'économie entre en décroissance à un taux de -1,4% par an, avec une frugalité subie qui rend les consommateurs opportunistes et désintéressés de la transition énergétique. Cela entraine une forte baisse du trafic longue distance (-21%), qui explique une

part importante de la diminution des émissions (-37%), et cela malgré un effondrement de la part du ferroviaire (de 28 à 8%).

De même, le **CGPC** fait l'hypothèse d'un scénario du même type, appelé « **Repli européen et déclin** », marqué par manque de gouvernance au niveau mondial et européen, une faible croissance, des crises d'approvisionnement énergétiques. Malgré la plus faible croissance des flux de transports (+18% pour les voyageurs entre 2002 et 2050) que dans les autres scénarios considérés, l'absence de taxation sur le CO_2 limite les progrès techniques et ainsi les émissions de CO_2 ne baissent que de 18%.

La même étude du **CGPC** présente un scénario de « **Grande Europe économique** », qui au contraire table sur une forte croissance (à 2 %/an), dans un contexte d'Europe politique renforcée. La croissance de la mobilité est également forte (+64% pour les voyageurs) avec notamment un triplement du trafic aérien, avec pour conséquence une baisse des émissions de CO_2 de seulement 8%.

2.2.2.1.2. Les évolutions tendancielles endogènes aux transports

Cette deuxième catégorie concerne les scénarios généralement annoncés comme tendanciels, dans les publications qui développent ensuite un ou plusieurs scénarios volontaristes dans les transports. Les scénarios de référence de négaWatt, Négatep, ou du CIRED-RAC ne sont pas détaillés ici car leur description est trop sommaire, mais les scénarios tendanciels de l'étude de la SNCF, du CGDD, de la DGEC, de l'ANCRE et du PREDIT sont classés dans cette catégorie et brièvement résumés ci-dessous (SNCF, 2015a ; CGDD, 2016c ; DGEC, 2015 ; ANCRE, 2014 ; Enerdata & LET, 2008).

Le scénario d'« **Ultramobilité** : toujours plus vite, toujours plus loin » de la **SNCF** se rapproche d'un scénario tendanciel dans lequel les tendances actuelles de grande mobilité, communication à distance et des modes routiers prédominants continuent à l'avenir. Ainsi, la mobilité des voyageurs augmente de 30% entre 2013 et 2050, la part de la voiture enregistre une légère diminution de 74,1 à 71,0%, et les émissions de CO_2 diminuent de 46%.

Le **scénario tendanciel** du **CGDD** prévoit pour sa part une augmentation de la demande de transport de 36% pour les voyageurs entre 2012 et 2050, et une part de la voiture qui passe de 84,4 à 77,5% (le périmètre initial n'est pas le même que pour l'étude de la SNCF ci-dessus). Les émissions de CO_2 ne diminuent que de 34% pour l'ensemble des transports, avec une baisse de 50% pour les voyageurs en partie compensée par la hausse de 26% des émissions du transport de marchandises.

De même, le scénario tendanciel de la **DGEC** est un scénario **avec mesures existantes (AME)**, c'est-à-dire effectivement adoptées et mises en œuvre au 1er janvier 2014. Le trafic de voyageurs augmente de 10% entre 2010 et 2035, le trafic ferroviaire de passagers de 35%, et le trafic de marchandises de 64%. Les consommations énergétiques du secteur des transports restent à peu près constantes, de même que les émissions de CO_2 qui ne baissent que de 2% sur la période.

Le **scénario tendanciel** de l'**ANCRE** est assez peu détaillé, à peine peut-on savoir que la croissance de la mobilité des voyageurs est de 26% entre 2010 et 2050, que la consommation énergétique totale baisse de 26% et que les émissions de CO_2 des transports terrestres baissent de 31%.

Enfin, **Pégase** correspond parmi les scénarios du **PREDIT** (LET & Enerdata, 2008) à celui qui se rapproche le plus d'un scénario tendanciel concernant la mobilité et les émissions de CO_2. Les principaux gains d'émissions réalisés dans ces scénarios reposent sur les progrès techniques, accompagnés par la réglementation environnementale et le développement de nouvelles infrastructures de transport. Malgré des hypothèses jugées optimistes sur la technologie, le scénario ne permet pas d'atteindre le facteur 4, avec des diminutions des émissions comprises entre 28 et 56% selon les variantes testées. Cela s'explique notamment par des croissances relativement fortes de la demande de transport de voyageurs et de marchandises, respectivement de +42% et de +61%.

2.2.2.2. Les scénarios volontaristes

2.2.2.2.1. Les évolutions volontaristes exogènes aux transports

Parmi les scénarios du **CGPC**, dont les évolutions sont principalement exogènes aux transports, 2 scénarios sont des scénarios volontaristes sur la transition énergétique.

C'est le cas du scénario « **Gouvernance mondiale et industrie environnementale** », où la coopération mondiale pour une forte taxation du carbone et un développement des nouvelles technologies peu émettrices de CO_2 permet de diminuer fortement les émissions (-62%), malgré la croissance des trafics de 50% pour les voyageurs et de 67% pour les marchandises.

De même, le scénario « **Gouvernance européenne et régionalisation** », dans lequel l'Europe accorde une place importante à l'emploi et aux valeurs environnementales, tendant vers une économie plus locale et un prix élevé de l'énergie. La mobilité terrestre n'est que modérément ralentie alors que le trafic aérien est plus affecté (+58% pour la mobilité tous voyageurs et +50% pour les marchandises), permettant une baisse de 40% du CO_2 émis.

2.2.2.2.2. Les évolutions volontaristes reposant essentiellement sur les politiques publiques des transports

Les trois catégories suivantes de scénarios volontaristes correspondent aux scénarios où les principales évolutions sont endogènes aux transports. Elles concernent en particulier des politiques publiques (fiscalité, investissements…) dans ce secteur, des évolutions des technologies dans les transports, et/ou des changements de comportement de mobilité des usagers. Selon le levier principal utilisé parmi ces évolutions, trois catégories ont été créées. Etant donné que les scénarios volontaristes utilisent en général une combinaison de ces trois leviers (voir Tableau 3), certains scénarios sont parfois difficiles à classer, cela sera précisé quand c'est le cas (notamment pour les scénarios de l'ADEME ou le scénario Chronos du PREDIT).

Dans les cinq scénarios suivants, les progrès réalisés sur les émissions de CO_2 sont obtenus principalement via des politiques publiques volontaristes : CGDD volontariste, le scénario AMS2 de la DGEC, le scénario bas-carbone acceptable du CIRED-RAC, le scénario Chronos du PREDIT, ainsi qu'un scénario de l'étude de Voyages SNCF.

Tout d'abord, le **scénario volontariste SNBC** du **CGDD** ajoute des mesures volontaristes supplémentaires au cadrage tendanciel, afin de se rapprocher des objectifs affichés dans la stratégie nationale bas-carbone. Ces mesures supposent également des progrès techniques supplémentaires et des changements dans les comportements de mobilité, mais ils sont en grande partie influencés et encouragés par les pouvoirs publics : efforts d'investissement supplémentaires en recherche et développement, aménagement du territoire et des réseaux de transport, politiques favorables au car et au covoiturage, aide au développement des carburants alternatifs (avec notamment le développement d'autoroutes électriques avec alimentation par caténaire), etc. Ces hypothèses supplémentaires ne concernent le transport de voyageurs pour les longues distances. La croissance de la demande de transport de voyageurs est moins forte que dans le scénario tendanciel (+28% contre +36%), la part de la voiture légèrement plus faible (75,9% contre 77,5%), et la baisse des émissions atteint -63% (contre -34% en tendanciel), dont -70% pour les voyageurs et -36% pour les marchandises.

Le **scénario AMS2** de la **DGEC** est sur le même principe et avec souvent les mêmes hypothèses que le scénario volontariste du CGDD. Il correspond à un scénario avec mesures supplémentaires, en particulier les mesures et objectifs prévus par la LTECV. La consommation énergétique des transports entre 2010 et 2035 baisse de 32% et les émissions baissent de 40%, alors que les niveaux étaient à peu près constants dans le scénario tendanciel. Par ailleurs, la modélisation économique montre des progrès importants dans le scénario AMS2 concernant la croissance du PIB et la création d'emploi, alors que les investissements nécessaires dans le domaine des transports sont estimés entre 4 et 6 milliards d'euros dans ce scénario (contre 3 milliards d'euros par an dans le scénario AME).

Dans le **scénario bas-carbone « acceptable »** du **CIRED-RAC**, le levier des politiques publiques est de loin le plus utilisé. Cela concerne pour beaucoup la fiscalité, où la taxe carbone présente un fort impact sur les trajectoires d'émissions, le bonus-malus est prolongé, une taxe écologique sur les poids-lourds est mise en place ainsi qu'une taxe sur le kérosène. De plus, une partie des financements des infrastructures routières est transférée vers les transports en commun, et des incitations économiques et/ou réglementaires sont mises en place sur le covoiturage, le télétravail, puis sur l'urbanisme afin de limiter l'étalement urbain. Ces évolutions conduisent aux résultats suivants : la mobilité des voyageurs augmente de 19%, avec des parts modales peu modifiées ; la consommation énergétique baisse de 41% ; les émissions baissent de 60%, dont 66% pour les voyageurs et 40% pour les marchandises.

Le **scénario Chronos** du **PREDIT** est le scénario le plus efficace parmi les 3 scénarios testés, quant à la panoplie des moyens utilisés pour atteindre le facteur 4. Il s'appuie essentiellement sur le développement d'infrastructures qui visent à faciliter la multimodalité verte (expliquant la présence du scénario aussi dans la catégorie Comportements-Altermobilité), et sur les solutions orientées vers les marchés (permis d'émissions et tarification). Par ailleurs, une contrainte réglementaire sur la vitesse est conjuguée à un renchérissement du coût des transports. La baisse de 20% des vitesses sur route se traduit par une hausse de 20% du budget-temps de transport, le temps devient donc la ressource rare. Malgré de fortes augmentations de la demande de transport (+35% pour les voyageurs et +61% pour les marchandises, avec une forte percée du fret ferroviaire), le scénario se rapproche du facteur 4 avec des baisses d'émissions de 51% à 74% selon les variantes.

Enfin, le scénario de « **Nouvelle gouvernance européenne** » de l'étude de **Voyages SNCF**, vient compléter cette catégorie. De nombreuses hypothèses sont exogènes au domaine des transports et le scénario est proche des scénarios du CGPC classés dans la catégorie des scénarios volontaristes aux évolutions exogènes. Mais les évolutions principales sont malgré tout ciblées de manière plus forte sur le secteur des transports : en effet, l'Europe obtient plus de pouvoirs et lance des programmes ambitieux de réglementation, de fiscalité et d'investissements, notamment pour la transition énergétique et les infrastructures de transports en commun. Ce scénario allie une croissance de la mobilité longue distance de +52%, couplée à une forte progression de la part de marché du fer (de 28% à 49%) et un facteur 2 sur les émissions (-52%), meilleure progression sur les 5 scénarios étudiés.

2.2.2.2.3. Les évolutions volontaristes avec des progrès technologiques importants dans les transports

Cinq scénarios ont été classés dans les scénarios volontaristes où les évolutions les plus marquées proviennent des technologies utilisées dans les transports. C'est le cas des scénarios ELE et DIV de l'ANCRE, des scénarios Négatep, GrDF, Greenpeace, ainsi que le scénario d'innovations technologiques de Voyages SNCF.

Les scénarios de l'**ANCRE** reposent sur des trajectoires technologiques cohérentes pour l'ensemble des domaines de la transition énergétique, avec une déclinaison logique et appliquée au secteur des transports. Ainsi, le scénario de « **Décarbonation par l'électricité (ELE)** », qui repose sur une rupture technologique sur le stockage massif de l'électricité, permet le développement des motorisations à l'électricité et à l'hydrogène dans les transports, qui représentent respectivement 27% et 16% du mix énergétique des transports en 2050. De même, le scénario « **Vecteurs diversifiés (DIV)** », où l'accent est mis sur le développement de nouveaux vecteurs énergétiques (comme la valorisation des sources de chaleur fatale et les bio-énergies), le mix énergétique des transports se diversifie avec le développement des biocarburants (37% en 2050), de l'électricité (12%) et du gaz naturel véhicule (26% du mix, dont la moitié provenant de ressources renouvelables). D'autres évolutions sont communes aux 2 scénarios : la demande de transport augmente de 26% pour les voyageurs et de 53% pour les marchandises ; les répartitions modales restent à peu près inchangées ; des gains de 50% (ELE) et 55% (DIV) sont réalisés dans la consommation unitaire des voitures. Ainsi les progrès reposent essentiellement sur la technologie, en l'occurrence sur les progrès d'efficacité énergétique et le déploiement des carburants alternatifs. Les politiques publiques seront utiles dans ces cas pour soutenir la R&D et le développement de ces filières. Ces évolutions permettent aux scénarios ELE et DIV d'atteindre le facteur 4 dans les transports, avec des baisses de 78% des émissions de CO_2.

Le **scénario Négatep** est très proche de la logique des scénarios ELE et dans une moindre mesure DIV de l'ANCRE, puisqu'il repose en grande partie sur la substitution des énergies fossiles par le vecteur électrique et les biocarburants. Ainsi, le nouveau mix énergétique des transports se compose à 40 % de biocarburants, à 32 % d'électricité, à 20 % de pétrole, puis de 8 % de biogaz. Des progrès technologiques importants sont aussi réalisés sur l'efficacité énergétique, avec des consommations de pétrole de 30 à 40 % plus faibles

aussi bien pour les voitures individuelles que pour les poids lourds. Par ailleurs, la demande de transport est constante pour les voyageurs, et des reports modaux sont réalisés sans être détaillés. Les émissions ne sont pas détaillées pour le secteur des transports mais elles baissent de 73% pour l'ensemble des émissions du secteur énergétique.

Le **scénario GrDF** accorde aussi une grande importance au choix des carburants, malgré une utilisation plus importante des leviers comportementaux : la demande de transport baisse de 14% pour les voyageurs et de 8% pour les marchandises ; des reports modaux relativement importants sont observés pour la mobilité des voyageurs, avec une baisse de 81% à 60% des parts cumulées de la voiture et l'avion pour le transport de voyageurs, au profit des transports en commun, du covoiturage et des modes non motorisés (multipliés par 7). Ainsi, la moitié du chemin est réalisée par une baisse des consommations énergétiques. La deuxième moitié est possible par la diversification énergétique des carburants, notamment d'origine renouvelables. Le gaz devient le vecteur le plus important dans le mix énergétique de 2050 avec 42% de l'énergie finale, dont les trois quarts sont d'origine renouvelable, tandis que l'électricité représente 13% du mix des transports. La diminution par 2 du contenu CO_2 de l'énergie utilisée permet d'atteindre le facteur 4 sur les transports, avec une diminution de 76% des émissions.

Enfin, le scénario d'« **Innovations technologiques** » de la **Voyages SNCF LD** est également classé dans cette catégorie. Comme pour le scénario ELE de l'ANCRE, la rupture provient de progrès dans le stockage de l'électricité, qui permet de diversifier les sources d'énergie pour l'ensemble des secteurs et notamment le secteur des transports. A nouveau ce scénario contient aussi de nombreuses hypothèses exogènes au transport, et notamment la forte croissance économique (à 2%/an) qui redynamise les secteurs économiques et la mobilité longue distance des voyageurs qui double quasiment entre 2013 et 2050. Dans le même temps, la part du ferroviaire dans cette mobilité augmente légèrement (de 28% à 33%) et les émissions de CO_2 ne diminuent que faiblement (-10%) en raison de la forte augmentation du trafic.

2.2.2.2.4. Les évolutions volontaristes misant sur de forts changements de comportement de mobilité

La dernière catégorie regroupe 8 scénarios volontaristes où les changements de comportement ont une grande importance dans les progrès sur les émissions de CO_2. Deux sous-catégories ont été créées, avec tout d'abord les scénarios dits d'altermobilité, qui tablent plutôt sur des modes de transport alternatifs à la voiture individuelle : le scénario le plus représentatif est celui d'Altermobilité de la SNCF, le scénario de l'ADEME s'en rapproche fortement bien que les leviers utilisés soient très variés, et le scénario Chronos du PREDIT a déjà été décrit, où il avait été vu que les investissements d'infrastructures visaient à favoriser la multimodalité verte.

L'autre sous-catégorie concerne les scénarios dont la tendance s'oriente plutôt vers la sobriété dans la demande de transport, notamment via un mode de vie plus local, et la sobriété dans les usages des moyens de transport. Cela concerne les scénarios négaWatt, SOB de l'ANCRE, Proximobilité de la SNCF, le scénario de sobriété renforcée de Voyages SNCF LD et le scénario Hestia du PREDIT.

Le scénario d'« **Altermobilité : se déplacer autrement** » de la **SNCF** prévoit que la grande mobilité et la communication à distance continuent à se développer, entrainant au final une augmentation de la mobilité des voyageurs de 10%. Cependant, le recours à l'automobile est limité et passe de 74,1% en 2013 à 63,5% en 2050, au profit des modes de déplacements alternatifs (multimodalité, vélo, transports collectifs). De même, le covoiturage et l'autopartage connaissent une forte croissance. Les émissions de CO_2 du transport de voyageurs baissent de 64% entre 2013 et 2050 (contre -46% dans le scénario d'Ultramobilité), illustrant principalement ici les changements dans les comportements de mobilité, via une diminution de la demande et surtout par le détachement relatif à la voiture individuelle.

Le scénario de la **vision 2050** de l'**ADEME** accorde aussi une place importante aux mobilités partagées, avec notamment le développement des services de mobilité qui représentent 30% de la mobilité urbaine, 20% en périurbain et 15% pour la longue distance. De même, l'usage de la voiture prend le dessus sur sa possession, et les véhicules sont plus facilement partagés, tout comme le covoiturage permet d'augmenter le taux de remplissage des voitures. L'ensemble de ces évolutions permet également de diminuer de 35 à 22 millions le parc de véhicules particuliers entre 2010 et 2050. Dans le même temps, la part des transports en commun et des modes actifs augmente : pour exemples, la part du train dans les déplacements longue distance passe de 25% à 40%, tandis que la part modale du vélo passe de 4 à 15% en milieu urbain et de 1 à 7% en milieu périurbain. La stabilisation de la demande de transport de voyageurs et de marchandises couplée à ces importants reports modaux, permettent une diminution par 3 des consommations énergétiques des transports. Néanmoins, les évolutions technologiques sont également importantes : les transports sortent complètement de la dépendance au pétrole, avec un mix composé à 49% par du gaz renouvelable, à 33% par de l'électricité et à 18% par les biocarburants. La conjugaison de ces progrès très importants dans les comportements de mobilité et les carburants utilisés permettent de mener à une diminution des émissions de CO_2 de 93%.

Le **scénario négaWatt**, comme celui de l'ADEME, est très volontariste et présente de grandes similarités dans les évolutions des comportements et des technologies. Il est connu notamment pour la place importante du questionnement des besoins en services énergétiques via la sobriété. Dans le domaine des transports, cela concerne la sobriété dans la demande de transport, qui diminue de 7,5% pour le transport de voyageurs et de 2,5% pour le transport de marchandises, par le développement d'autres moyens techniques (télétravail, conférences via internet), une meilleure organisation du territoire, ou une rationalisation de certains trajets, notamment ceux en avion (qui sont divisés par 2). Cela concerne également la sobriété dans les équipements et les usages, avec une baisse du poids des véhicules et une baisse de la vitesse sur les routes. Enfin, la sobriété coopérative est développée avec un meilleur partage des trajets et des véhicules. Ces évolutions permettent une division par 3 des consommations énergétiques, aidées par le développement des moteurs hybrides. Elles sont accompagnées par les pouvoirs publics et par le déploiement de carburants alternatifs au pétrole : le mix énergétique des transports en 2050 est composé à 51% de gaz renouvelable, à 16% d'électricité, à 10% de biocarburants, et à 23% par les énergies fossiles (pétrole à 17% et gaz à 6%). Les émissions de CO_2 ne sont pas détaillées par secteur mais la diminution pour l'ensemble des secteurs énergétiques est de 93%.

Le scénario « **Sobriété renforcée (SOB)** » de l'**ANCRE** contient comme les autres scénarios de l'ANCRE des hypothèses fortes sur les progrès technologiques : le secteur énergétique développe la capture et stockage de CO_2 et l'effacement de la demande électrique, et les consommations unitaires des voitures baissent de 55%. Mais l'accent est mis sur la sobriété dans ce scénario, avec une demande de transport de voyageurs constante et en hausse de 10% pour les marchandises, contre +25% et +53% pour les scénarios ELE et DIV. Cela est permis grâce à une modification de l'aménagement urbain et des infrastructures de transport, au développement du télétravail, à la rationalisation du trafic, au développement des productions locales, ou à la généralisation de la livraison à domicile. De même, les comportements de mobilité changent, et la part de la voiture dans la mobilité des voyageurs passe de 80% à 50% de 2010 à 2050. Des caractéristiques de l'altermobilité sont ainsi bien présentes, avec un développement des flottes servicielles, de petits véhicules électriques urbains, et des modes de transport doux. L'ensemble de ces changements permet une diminution des consommations énergétiques des transports de 57% (contre 49% et 42% pour ELE et DIV). Cependant, le moindre développement des carburants alternatifs au pétrole, qui représente encore 64% du mix en 2050, ne permet de réduire les émissions des transports que de 70%, au lieu de 78% pour ELE et DIV.

Dans le scénario « **Proximobilité : la qualité de vie de la proximité** » de la **SNCF**, l'aspiration à une qualité de vie à proximité de chez soi est privilégiée, et permet de maintenir la demande de transport de voyageurs constante. Dans le même temps, les modes de déplacements alternatifs sont développés, en particulier les modes actifs avec la marche qui est multipliée par 2 et le vélo par 6. De même, les TCU, l'auto-partage, le covoiturage et les taxis partagés sont développés, ce qui permet la baisse de la part de la voiture individuelle non partagée de 72,6% à 43,6% entre 2013 et 2050. C'est le scénario de l'étude qui permet les plus fortes réductions d'émissions de CO_2, qui atteignent 71%.

De même, l'étude de **Voyages SNCF** présente un scénario de « **Société fondée sur la sobriété** », où les individus prennent conscience d'une indispensable modification des comportements et se lancent dans une transition écologique citoyenne. La demande de transport n'augmente que faiblement (+22%) entre 2013 et 2050, et la part de marché du fer dans la longue distance reste constant (à 28%), ce qui permet une réduction de 48% des émissions de CO_2 sur la période.

Enfin, le scénario **Hestia** du **PREDIT** fait également l'hypothèse d'un recentrage, contraint ou choisi, sur des activités de proximité. Cela est favorisé par un réaménagement de l'espace, une forte hausse des coûts de transport, et de nouveaux arbitrages dans leurs choix de localisation des ménages et des entreprises. Ainsi, des changements radicaux dans l'organisation de la production, de la consommation et des modes de vie, dans le sens d'une diminution des distances parcourues. La demande de transport totale augmente donc plus faiblement que dans les autres scénarios, de 13% pour les voyageurs et de 21% pour les marchandises. La part de la voiture diminue de 77% à 52% de 2000 à 2050, au profit du train et des autres transports collectifs. Sur la longue distance, un système de permis d'émissions négociables sur l'avion permet de fortement privilégier le TGV. L'ensemble des évolutions du scénario permet de s'approcher fortement du facteur 4, avec une diminution des émissions de CO_2 de 60 à 75% selon les variantes testées.

2.3. Les principaux résultats des scénarios

2.3.1. Les évolutions des principaux paramètres dans les scénarios

Le tableau et les figures suivants présentent de manière synthétique l'évolution des principaux paramètres dans les scénarios étudiés (certains scénarios ne sont pas sur la Figure 14 et la Figure 17 en raison d'une différence de périmètre ou des données manquantes).

Notes pour le Tableau 4

- ✓ *Les valeurs en italique correspondent à des valeurs calculées, les autres sont données telles quelles dans les publications ;*

(1) Correspond au taux de croissance total du paramètre entre l'année de référence et l'année de projection ;
(2) TCAM : taux de croissance annuel moyen sur la période considérée ;
(3) Données issues de l'étude de Carbone 4, 2014 ;
(4) Selon la valeur que l'on prend en compte pour les biocarburants : 10 Mtep sont produits à partir de 17,5 Mtep de biomasse et de 7,5 Mtep d'électricité. Dans la suite des graphiques, la valeur de 10 Mtep et donc la réduction de 49% est retenue ;
(5) Les émissions de CO_2 de l'ANCRE ne concernent que le transport terrestre (du réservoir à la roue).

Notes pour les Figure 14, Figure 15, Figure 16 et Figure 17

- ✓ Etant donné les différents sous-scénarios pour l'étude Enerdata-LET, une valeur moyenne des réductions d'émissions a été retenue ;
- ✓ Pour les Figure 14, Figure 15 et Figure 17, les taux de croissance totaux sont retenus, les publications plus anciennes ont donc en principe des taux de croissance plus élevés en valeur absolue que les scénarios les plus récents. La Figure 16 résout ce biais en indiquant les taux de croissance annuels moyens (TCAM) ;
- ✓ Pour les Figure 15 et Figure 16, à chaque publication correspond une couleur. Une couleur peut donc être associée à plusieurs scénarios ;
- ✓ Ces figures permettent notamment de visualiser les scénarios qui permettent d'atteindre le facteur 4 pour l'ensemble des transports, avec les barres vertes pour les Figure 14 et Figure 17, et le dernier paramètre à droite pour la Figure 15.

L'intérêt de cette décomposition est aussi d'identifier l'importance des différents paramètres et les principaux leviers d'efficacité dans les scénarios. Même si les données sont souvent manquantes pour réaliser ce type de calcul sur plusieurs scénarios, les résultats finaux des réductions d'émissions de CO_2 pourraient potentiellement être décomposés par exemple de la manière suivante, et s'appliquer au transport de voyageurs (voir exemple p 61) ou au transport de marchandises :

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Demande de transport}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{Energie}}{\text{Transport}} \times \frac{\text{CO2}}{\text{Energie}}$$

Cette identité rappelle l'équation IPAT (« Impact = Population x Affluence x Technology »), utilisée pour décomposer les émissions de CO_2 selon la population, le revenu par personne, et la technologie utilisée.

Tableau 4 : Evolution cumulée (en %) des principaux paramètres des scénarios étudiés, entre l'année de référence et l'horizon

Scénario tiré de		CGDD 2016		DGEC 2014-15		SNCF 2015, sobre en CO2			SNCF 2015, longue distance					Négatep 2014	NégaWatt 2011-13	ADEME 2014
Nom du scénario		**Tend.**	**SNBC**	**AME 2035**	**AMS2 2035**	**Ultra.**	**Alter.**	**Proxi.**	**Tend.**	**Cata. éco.**	**Sob.**	**Gouv. eur.**	**Innov. techn.**	**Négatep**	**négaWatt 2050**	**Vision 2050**
Année de référence		2012	2012	2010	2010	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2013	2012	2008-10	2010
Année de projection		2050	2050	2035	2035	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Hypothèses structurantes																
Population	*Tx de ↑ total* (1)	*+21%*	*+21%*	*+12%*	*+12%*	*+13%*	*+13%*	*+13%*	*+9%*	*+3%*	*+9%*	*+17%*	*+17%*	*+9%*	*+16%*	*+18%*
	Millions hab.	77,4	77,4	73,3	73,3	72,0	72,0	72,0	69,5	65,7	69,5	74,7	74,7	70	72,3	74,13
Croissance PIB	*Tx de ↑ total*	*+91%*	*+91%*	*+44%*	*+44%*	*+45%*	*+45%*	*+45%*	*+32%*	*-41%*	*+20%*	*+42%*	*+104*	*+112%*		*+104%*
	TCAM (2)	1,6%	1,6%	+1,5%	+1,5%	+1%	+1%	+1%	+0,7%	-1,4%	+0,4%	+0,9%	+1,9%	*+2,0%*		+1,8%
Prix du pétrole	*€ ou $/baril*	152 $	152 $	95,9 €	95,9 €				170 $	60 $	170 $	130 $	100 $	100 $		231 $
Demande de transport																
Voyageurs	*Tx de ↑ total*	*+36%*	*+28%*			+30%	+10%	0%	+25%	-21%	+22%	+52%	+97%	0% (3)	*-7,5%*	0%
Marchandises	*Tx de ↑ total*	*+90%*	*+90%*	*+64%*	*+64%*									+13% (3)	-2,5%	0%
Consommation d'énergie																
Transports	*Tx de ↑ total*			*+1%*	*-32%*									*-29/-49%* (4)	*-66%*	*-64%*
Voyageurs	*Tx de ↑ total*								*+1%*	*-30%*	*-29%*	*-39%*	*+16%*		*-65%*	
Marchandises	*Tx de ↑ total*														*-66%*	
Emissions de CO2																
Transports	*Tx de ↑ total*	-34%	-63%	*-2%*	*-40%*										*-93% env.*	*-93%*
Voyageurs	*Tx de ↑ total*	*-50%*	*-70%*			*-46%*	*-64%*	*-71%*	*-5%*	-37%	-48%	-52%	-10%			
Marchandises	*Tx de ↑ total*	*+26%*	*-36%*													

Publication	ANCRE 2013				GrDF 2013	Greenpeace 2013	CIRED-RAC, 2012	Enerdata-LET 2008			CGPC 2006			
Scénario	**Tend**	**SOB**	**ELE**	**DIV**	**GrDF 2050**	**Scénario de TE**	**Bas-C. acceptable**	**Pégase**	**Chronos**	**Hestia**	**Gouv. et ind. env.**	**Repli et déclin**	**Gde Europe éco.**	**Gouv. eur. et régional.**
Année réf	2010	2010	2010	2010	2010	2009	2010	2000	2000	2000	2002	2002	2002	2002
Année proj	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Hyp structu														
Population	*+15%*	*+15%*	*+15%*	*+15%*		*+18%*	15%	*+5%*	*+5%*	*+5%*				
	72,3	72,3	72,3	72,3		76,1	72,3	67,0	67,0	67,0	67,0	59,0	67,0	70,0
↑ PIB		*+96%*	*+96%*	*+96%*		*+73%*	*+73%*	*+111%*	*+111%*	*+111%*	*+104%*	*+61%*	*+159%*	*+104%*
		+1,7%	+1,7%	+1,7%		*+1,3%*	+1,24%	+1,5%	+1,5%	+1,5%	+1,5%	+1,0%	+2,0%	+1,5%
Prix pétrole		165 €	165 €	165 €		126 €	160 €				30 $	60 $	90 $	180 $
Demande de T														
Voy.	*+26%*	*+1%*	*+26%*	*+26%*	*-14%*	0%	19%	+42%	+35%	+13%	+50%	+18%	+64%	+58%
March.		*+10%*	+53%	+53%	*-8%*			+61%	+61%	+21%	+67%	-6 à +17%	+46 à 82%	+50%
Conso énergie														
Transports	*-29%*	*-57%*	*-49%*	*-42%*	*-49%*	*-59%*	-41%							
Voy.														
March.														
Emissions CO2														
Transports	-31% (5)	-70%	-78%	-78%	*-76%*	-93,8%	-60%	-28 à -56%	-51 à -74%	-60 à -75%	-62%	-19%	-8%	-40%
Voy.							-66%	*-66%*	*-76%*	*-84%*				
March.							-40%	*-30%*	*-56%*	*-57%*				

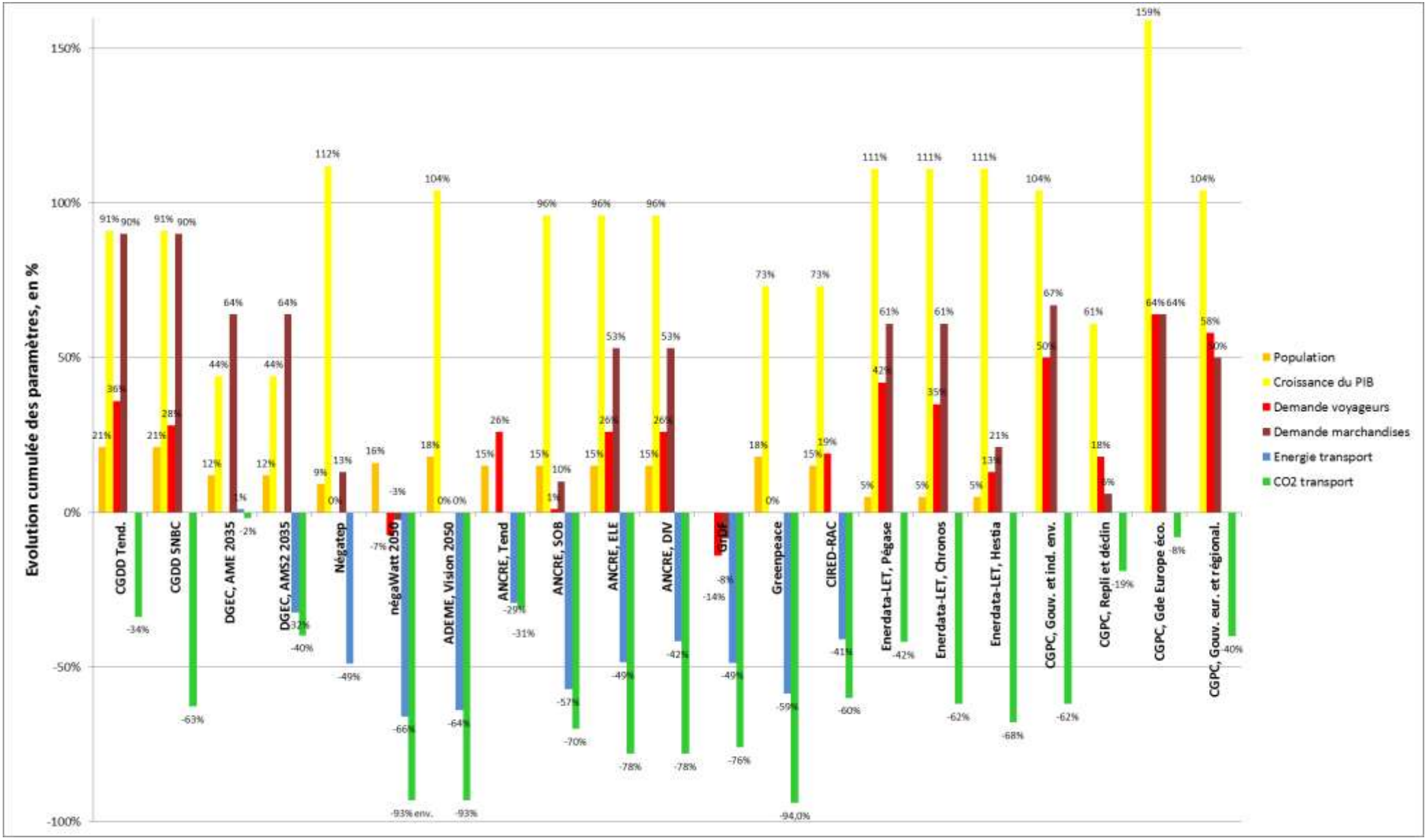


Figure 14 : Evolution cumulée des principaux paramètres pour le transport, dans les principaux scénarios étudiés. Classement par scénario.

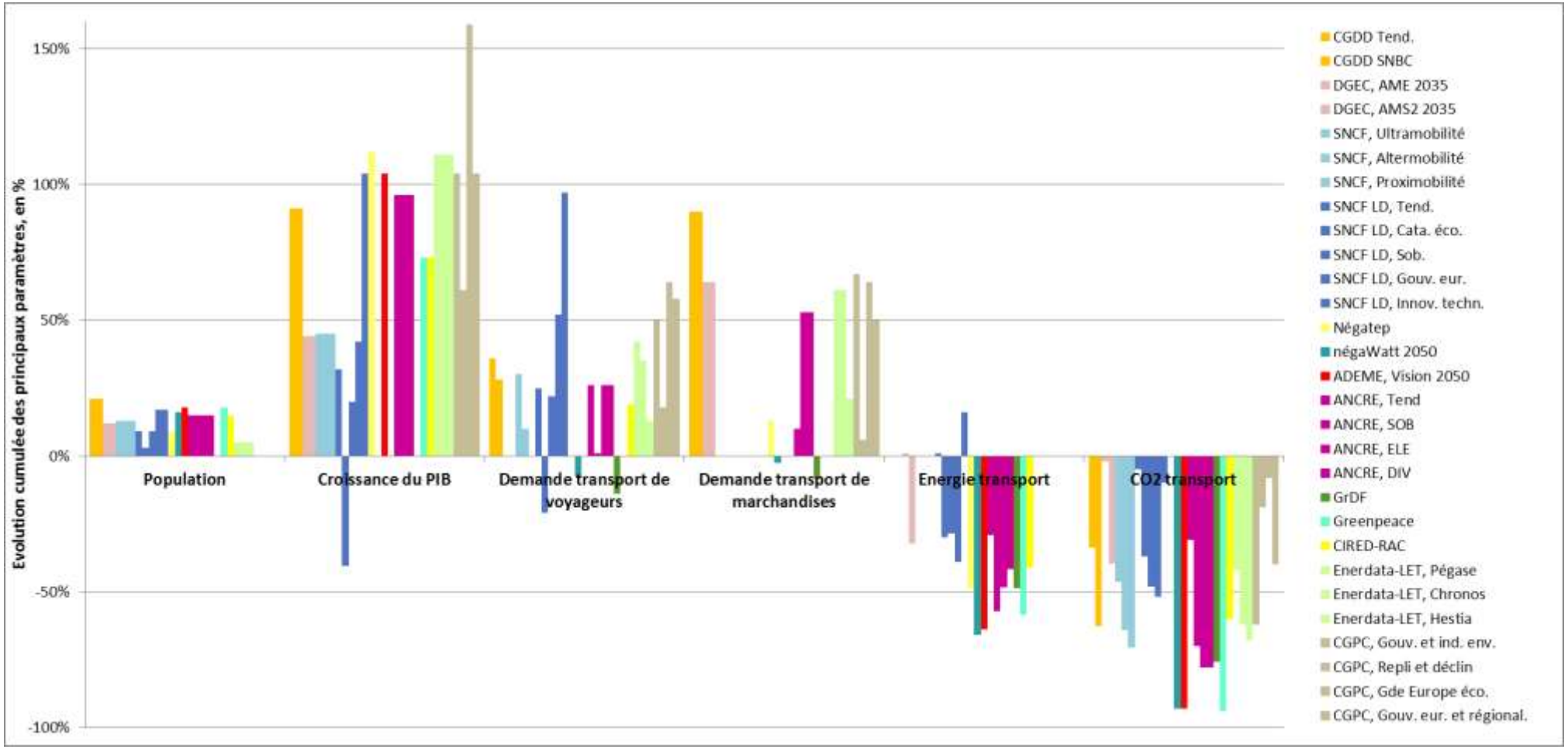


Figure 15 : Evolutions cumulées des principaux paramètres pour les scénarios étudiés. Classement par paramètre.

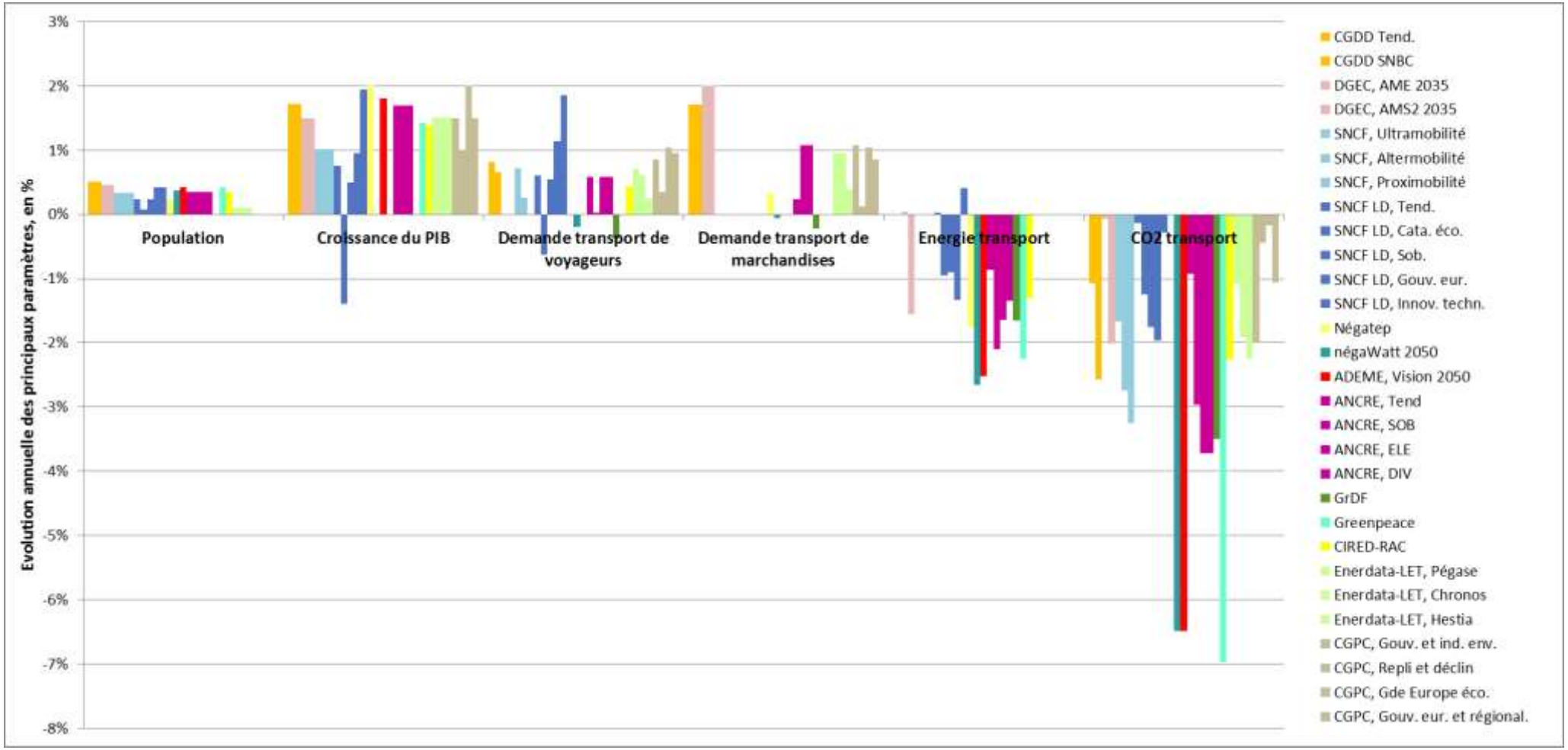


Figure 16 : Evolutions annuelles (TCAM sur la période) des principaux paramètres pour les scénarios étudiés. Classement par paramètre.

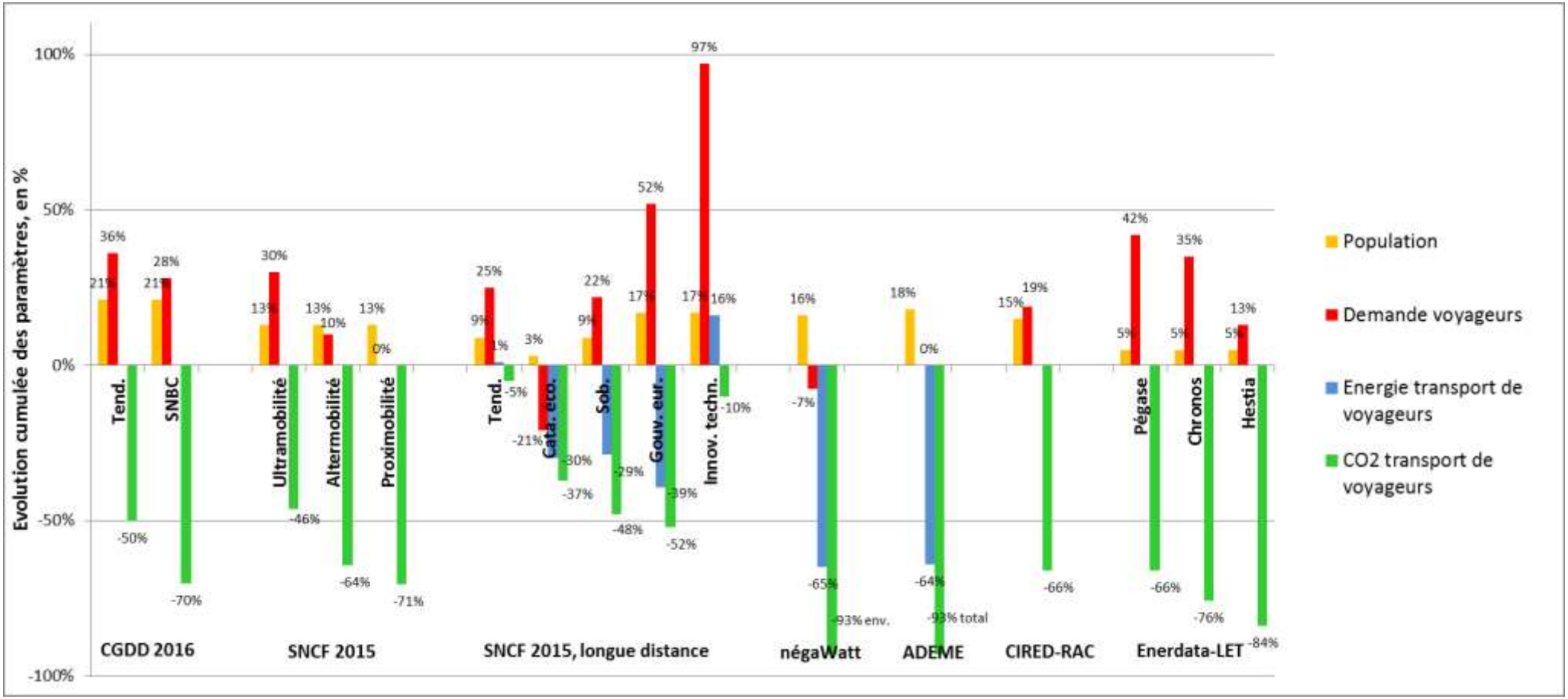


Figure 17 : Evolution des principaux paramètres pour le transport de voyageurs, dans les scénarios étudiés

2.3.2. Seule la moitié des scénarios volontaristes atteignent la contribution au facteur 4

2.3.2.1. Le tableau et les figures ci-dessus illustrent la difficulté à atteindre le facteur 4

Parmi les 27 scénarios à 2050, 5 d'entre eux sont des scénarios tendanciels et 3 scénarios ne sont considérés ni tendanciels ni volontaristes, en raison d'évolutions de ruptures exogènes au transport (voir Tableau 3).

Parmi les 19 scénarios volontaristes, seulement 3 scénarios dépassent largement l'objectif du facteur 4, ce sont ceux de négaWatt, de l'ADEME et de Greenpeace, qui impliquent des ruptures très importantes. De plus, 6 autres scénarios atteignent la contribution des transports au facteur 4 (-70%) : c'est le cas des 3 scénarios de l'ANCRE, du scénario de GrDF, de Négatep, et du scénario Proximobilité de la SNCF pour les voyageurs. Les scénarios Chronos et Hestia de Enerdata-LET l'atteignent seulement sous certaines variantes.

Enfin, sans l'atteindre, le scénario volontariste SNBC, le scénario d'Altermobilité de la SNCF, le scénario bas-carbone « acceptable » du CIRED-RAC et le scénario gouvernance et industrie environnementale du CGPC permettent de se rapprocher fortement de la contribution du secteur des transports prévue dans la SNBC pour l'atteinte du facteur 4, avec des réductions d'émissions supérieures à 60%.

Les 3 scénarios de la SNCF portant uniquement sur le transport longue distance (Société fondée sur la sobriété, Nouvelle gouvernance européenne et Innovations technologiques) atteignent au mieux un facteur 2, et le scénario de Gouvernance européenne et régionalisation du CGPC ne permet qu'une réduction de 40% des émissions.

2.3.2.2. Le transport des voyageurs plus facile à décarboner que le transport de marchandises

Seulement 3 études donnent des chiffres à la fois sur la réduction des émissions de CO_2 pour le transport de voyageurs et le transport de marchandises : le CGDD, le CIRED-RAC et Enerdata-RAC. Dans ces 3 cas, les réductions d'émissions sont plus importantes pour le transport de voyageurs que pour le transport de marchandises. A cela, il est possible d'avancer les explications suivantes :

- ✓ La croissance de la mobilité des voyageurs est essentiellement conditionnée par la croissance de la population, qui croît au maximum de 0,5% par an en moyenne, et leur mobilité individuelle est contrainte par leur budget temps de transport relativement constante au cours du temps ; au contraire, le transport de marchandises est fortement dépendant à la croissance économique, qui est estimée entre 1 et 2% par en général dans les scénarios (Figure 16) ;
- ✓ Le report modal est plus difficile pour le transport de marchandises, surtout quand les transports ne sont pas massifiés, c'est-à-dire pour de petits volumes et/ou de courtes distances où les alternatives aux poids-lourds sont souvent inexistantes ;
- ✓ Enfin, le développement de véhicules électriques est plus compliqué pour les poids-lourds, en raison du poids très important des batteries qui seraient nécessaires, qui entraineraient une baisse de la capacité d'emport des véhicules (CGDD, 2016d).

2.3.2.3. Le progrès technique seul ne peut permettre qu'un facteur 2 au mieux

Cet ordre de grandeur de facteur 2 technologique est cité par l'étude d'Enerdata-LET, en prenant des hypothèses très optimistes sur les progrès technologiques espérés. De tels progrès pourraient d'ailleurs justifier de classer ce scénario parmi les scénarios volontaristes, puisqu'ils nécessitent des évolutions importantes des politiques publiques ainsi que des innovations dans le secteur des transports pour favoriser l'essor de ces technologies.

De même, le scénario d'Ultramobilité de la SNCF sur le transport de voyageurs est un scénario majoritairement tendanciel dans lequel les progrès technologiques ne permettent que de se rapprocher du facteur 3, avec une baisse des émissions de 46% entre 2013 et 2050.

Les autres scénarios tendanciels confirment cet ordre de grandeur comme un maximum, avec des réductions qui se limitent à -34% pour le CGDD, -31% pour l'ANCRE, et -5% seulement pour l'étude SNCF sur le transport longue distance.

2.3.2.4. Une combinaison des leviers politiques, technologiques et comportementaux est nécessaire pour atteindre le facteur 4

Etant donné l'insuffisance de la technologie seule pour atteindre le facteur 4, d'autres mesures politiques (fiscalité, investissements dans des infrastructures) et des changements dans les modes de vie et les comportements sont donc nécessaires.

C'est de ces 3 leviers d'actions (politiques publiques, technologie, et comportements) dont il est question dans le chapitre suivant, en détaillant les 5 domaines d'actions utilisés dans les scénarios, et en les appliquant ensuite à un modèle de transport portant sur le choix modal entre RER et voiture.

3. Les mesures permettant d'atteindre le facteur 4

3.1. Les mesures et évolutions nécessaires dans les transports

Il est généralement admis qu'il existe entre 3 et 5 grands axes d'action pour réduire les émissions de CO_2 dans les transports. Tout d'abord, l'agence européenne de l'environnement identifie les 3 leviers suivants (EEA, 2010) :

- ✓ Limiter (*avoid*), c'est-à-dire prendre des mesures permettant de diminuer la demande totale de transport ;
- ✓ Choix modal (*shift*), qui correspond au report modal depuis les modes les plus consommateurs d'énergie et les plus émetteurs vers des modes plus durables ;
- ✓ Améliorer (*improve*), à l'aide de mesures majoritairement technologiques de réduction des consommations énergétiques et de passage à des carburants bas-carbone.

En divisant la dernière catégorie en 2 sections indépendantes, le GIEC distingue 4 types d'action (3ème groupe de travail sur l'atténuation ; IPCC, 2014c) :

- ✓ Limiter : éviter les trajets inutiles (télétravail, achats en ligne) et réduire les distances de parcours (densification des villes, proximité des services, « mixed-zoning of cities »…) ;
- ✓ Choix modal : passage des modes les plus polluants (avion, voiture individuelle) vers des modes moins énergivores (transports en commun, vélo, marche), que ce soit par de la planification urbaine ou le développement d'infrastructures suffisantes ;
- ✓ Intensité énergétique : amélioration des performances des véhicules, optimisation de la logistique du fret ;
- ✓ Décarbonation de l'énergie utilisée : exemple des biocarburants ou électrique et hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables.

Enfin, une classification en 5 catégories permet de faire apparaître plus clairement le taux de remplissage des moyens de transport de voyageurs (dont le covoiturage) et de marchandises. C'est la décomposition utilisée par Carbone 4 (Figure 18 ; Carbone 4, 2014) et par la stratégie nationale bas-carbone (Figure 19 ; MEDDE, 2015c), et qui a été utilisée pour l'analyse des scénarios dans la présente étude.

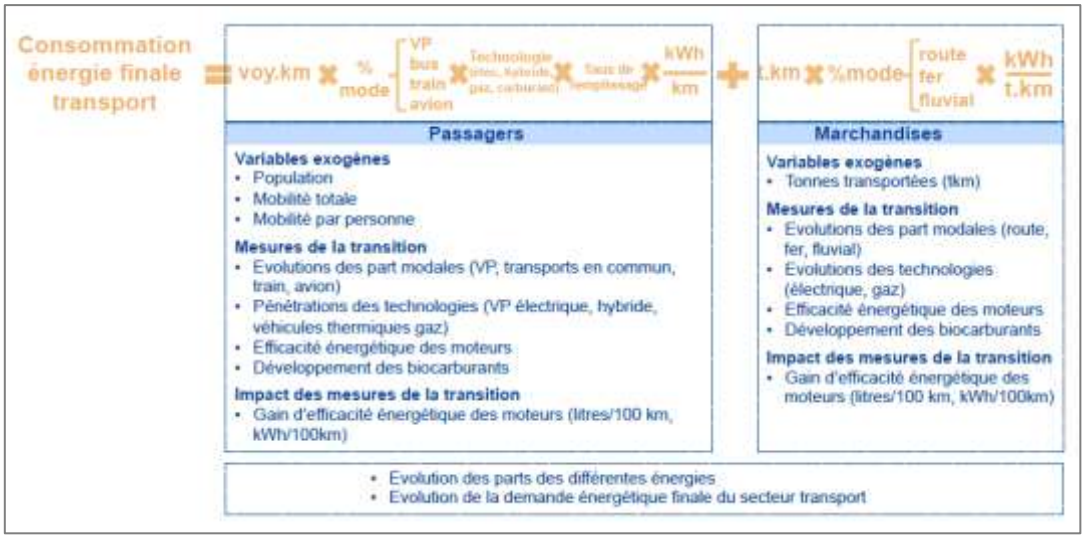


Figure 18 : Variables, mesures et impacts de la transition énergétique dans les transports (Carbone 4, 2014)

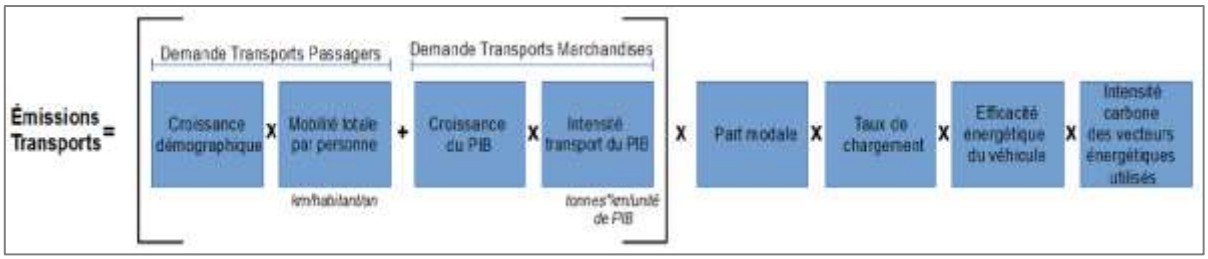


Figure 19 : Facteurs structurant les émissions des transports (MEDDE, 2015c)

Le choix a été fait de garder cette classification en 5 facteurs. La seule différence avec ces approches de Carbone 4 et du MEDDE est d'intégrer aussi l'autopartage dans la catégorie du taux de remplissage des véhicules, mesure souvent oubliée dans ces classifications. Cette catégorie pourrait donc s'appeler « partage et taux de remplissage des véhicules », ce qui donne :

1) Limitation des déplacements
2) Choix modal
3) Partage et taux de remplissage des véhicules
4) Efficacité énergétique
5) Choix des carburants

A noter la complémentarité de ces catégories d'actions avec les types d'évolutions et de mesures qui ont été identifiées plus haut : les mesures de politiques publiques, les progrès technologiques et les changements de comportement. Tandis que les politiques publiques peuvent s'appliquer aux 5 catégories d'actions, les progrès technologiques correspondent essentiellement à l'efficacité énergétique et au choix des carburants, et au contraire les changements de comportement s'appliquent plutôt aux 3 premières catégories d'actions (limitation des déplacements, choix modal et partage des trajets et des véhicules).

Les mesures citées dans les différentes études sont donc présentées dans cette partie, en précisant quand cela est possible les scénarios qui citent ce type de mesure (la liste de ces études n'étant pas toujours exhaustive), et en essayant autant que possible d'évaluer leur potentiel, leur acceptabilité ou encore la facilité de mise en place. Ce travail sera parfois enrichi par des études ou des éléments extérieurs aux scénarios étudiés ici.

Enfin, on peut noter que cette classification rappelle l'équation IPAT déjà citée plus haut. Il est compliqué de réaliser une décomposition complète pour tous les scénarios car les données sont généralement incomplètes, et le choix modal ne peut pas exemple pas être résumé par un seul chiffre. Cependant, il est possible de l'appliquer partiellement, comme cela a été fait par le CIRED et le RAC pour d'anciens scénarios, avec les 3 critères de population, consommation d'énergie finale dans les transports par personne, et contenu carbone de l'énergie finale (CIRED-RAC, 2010).

Une équation est ici proposée de manière plus détaillée et en prenant en compte uniquement le transport de voyageurs pour le scénario négaWatt (voir Figure 17) :

$$CO_2 = \text{Population} \times \frac{\text{Transport}}{\text{Population}} \times \frac{\text{Véhicules}}{\text{Transport}} \times \frac{\text{Energie}}{\text{Véhicules}} \times \frac{CO2}{\text{Energie}}$$

Ainsi, la baisse de 93% des émissions de CO_2 sur la période (soit 0,07 fois la valeur initiale), se répartit de la façon suivante entre les différents paramètres :

0,07 = 1,16 x 0,80 x 0,75 x 0,50 x 0,20

- ✓ Population : **+16%** ;
- ✓ Demande de transport par personne : **-20%** ; *Transport/Population = 0,93/1,16 = 0,80, car la demande de transport baisse de 7% ;*
- ✓ Taux de remplissage des véhicules : **-25%** ; *Véhicules/Transport, besoin de 25% de véhicules en moins pour satisfaire la demande, hypothèse négaWatt ;*
- ✓ Intensité énergétique du transport : **-50%** ; *Energie/Véhicules = 0,35/0,70 = 0,50 ; 0,35 car la consommation d'énergie diminue de 65% ; et 0,70 pour 0,93x0,75 = 0,70 ;*
- ✓ Intensité carbone de l'énergie : **-80%** ; *CO_2/énergie = 0,07/0,35 = 0,2.*

3.1.1. Limiter : une nécessaire modération des déplacements

Il est évident que plus la demande de transport de voyageurs et de marchandises augmente, plus il sera difficile d'atteindre de fortes réductions des émissions de CO_2. Ainsi, les scénarios les plus volontaristes prévoient une forte remise en question des besoins de transports, en identifiant les sources possibles de réduction.

Le facteur démographique, jugé exogène, prévoit une augmentation de la population et donc des besoins de mobilité, mais aussi un certain vieillissement de la population, ce qui aurait tendance à réduire la demande de mobilité. Mais au-delà des facteurs exogènes, les pouvoirs publics mais aussi les entreprises et les ménages peuvent agir à différents niveaux : principalement via une réorganisation du territoire dans une logique de réduction des déplacements, mais aussi via le développement du télétravail ou de modes de consommation réduisant les déplacements pour motif d'achats.

Cumulées, ces évolutions peuvent mener à une constance ou une faible baisse de la mobilité globale pour les scénarios les plus ambitieux (-14% pour GrDF, -7% pour négaWatt, 0% pour ADEME, Greenpeace ou le scénario Proximobilité de la SNCF), impliquant une baisse de la mobilité individuelle, par exemple de 20% pour le scénario négaWatt. En revanche, un grand nombre de scénarios plus tendanciels postule une augmentation des déplacements totaux autour de 25%.

3.1.1.1. Urbanisme et organisation du territoire

L'urbanisme et l'organisation du territoire étant par définition des enjeux de long terme, ils doivent être pensés de manière à limiter et faciliter les déplacements à la fois des personnes et des marchandises. C'est de plus un domaine qui présente une grande inertie, la ville de 2040 étant déjà construite à 80% (Orfeuil, 2016). Les décisions sur la construction des nouveaux logements pour les ménages, les choix de localisation des entreprises, des lieux d'activités ou encore des commerces ont un impact sur la mobilité pour plusieurs décennies. Ainsi les études mettent en avant la nécessité de freiner l'étalement urbain et de re-densifier les centres-villes (CGDD, ADEME, négaWatt, CIRED-RAC, Enerdata-LET, etc.), pour que soient réduites les distances de la mobilité régulière et locale, qu'elle ait pour motifs de se

rendre au travail, à des activités de loisirs ou pour des achats divers. Le scénario Hestia de l'étude Enerdata-LET évoque en effet des « nouvelles configurations des bassins de vie et de consommation » (Lopez-Ruiz et Crozet, 2011), tout comme d'autres scénarios misant sur la sobriété mettent en avant « la qualité de vie de la proximité » (SNCF, 2015a). Parmi les outils à disposition, une meilleure prise en compte de ces enjeux dans la politique d'aménagement du territoire par les collectivités ainsi que des modifications dans le droit et la fiscalité de l'urbanisme, sont souvent citées comme nécessaires pour accompagner cette mutation.

Malgré l'inertie des parcs de bâtiments résidentiels et tertiaires, l'évolution des distances de déplacements et notamment des trajets domicile-travail n'est pas figée. En effet, en Ile de France et sur 10 ans, 80 % des actifs ont changé de lieu de domicile, de lieu de travail ou des deux (Orfeuil, 2016). Cela laisse ainsi de grandes marges de manœuvre pour que cette mobilité résidentielle et professionnelle permette une meilleure optimisation des déplacements. C'est ce que prône notamment le scénario de Proximobilité de la SNCF, en proposant de faciliter les déménagements via des aides fiscales si celui-ci permet de se rapprocher de son emploi.

Enfin, un recentrage sur une vie de proximité faciliterait également le report modal vers les modes actifs (vélo et marche à pied), très efficaces pour les courtes distances.

3.1.1.2. Le télétravail

La France présente un fort retard sur ses voisins en termes de télétravail, avec seulement 9% des salariés réalisant du télétravail au moins un jour par mois, contre 18% pour la moyenne européenne et jusque 25% dans les pays du nord de l'Europe (Carbone 4, 2016). De nombreux scénarios (DGEC, SNCF, ADEME, négaWatt, ANCRE) prévoient que le développement du télétravail participera à réduire la demande totale de déplacements. L'étude du CIRED-RAC fait l'hypothèse qu'en moyenne 1 jour travaillé sur 10 en 2050 se fera en télétravail. Un objectif de 10% des jours télé-travaillés est justement fixé dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) à horizon 2030 (MEEM, 2016b).

Bien évidemment, tous les actifs ne peuvent pas forcément télétravailler. En effet, les emplois dans l'agriculture, l'industrie, le commerce, la santé, l'éducation ou encore la sécurité nécessitent d'être présent à un endroit donné. Cependant, une partie importante des emplois peuvent faire l'objet d'une politique de télétravail sur une partie de la semaine. Ainsi, permettre seulement 1 jour de télétravail par semaine permet de réduire de 20% les déplacements domicile-travail du salarié, 60% avec 3 jours par semaine.

Les avantages sont nombreux. La productivité en bénéficierait puisque celle-ci serait maximale lorsque le télétravail représente 50% du temps travaillé (étude du Danish Technological Institute, dans Carbone 4, 2016). Les potentiels de réduction d'émission seraient forts aussi, Carbone 4 ayant évalué qu'une personne qui passe 3 jours par semaine en télétravail peut économiser 0,7 teqCO_2 par an, ce qui représente 7% de son bilan carbone annuel personnel. Enfin, les économies pour le salarié et l'entreprise peuvent représenter respectivement 650 et 2000€ par an d'après leurs calculs (Carbone 4, 2016).

Cependant il peut y avoir un effet rebond au télétravail, poussant des personnes à choisir un emploi loin de leur domicile sans déménager plutôt que de le refuser ou déménager. Au final cela peut rendre les déplacements totaux plus élevés que sans politique de télétravail (Forum Vies Mobiles, 2016).

3.1.1.3. Livraisons à domicile, consommation locale, incitations à la sobriété

Le scénario SOB de l'ANCRE cite également la généralisation des **livraisons à domicile** comme moyen de réduire la demande de mobilité. Cela illustre l'interdépendance qu'il y a entre mobilité des personnes (par exemple pour motif d'achats) et le transport de marchandises. En effet, les services de livraison, actuellement en plein développement, permettent de s'affranchir de certains déplacements de consommation en se faisant livrer à domicile.

Mais la livraison à domicile ne peut permettre une baisse globale de la circulation que si elle permet une optimisation des flux, par exemple en remplaçant 10 voitures qui seraient parties s'approvisionner dans un supermarché par une camionnette qui ferait une boucle pour approvisionner les 10 clients. Au contraire, le risque serait de multiplier de nombreux services de livraison indépendants et non optimisés, qui ne feraient qu'accroitre la circulation globale des véhicules.

En même temps, il est possible d'espérer que les systèmes de livraison de ce type puissent être réalisés de plus en plus par des flottes de véhicules électriques ou en vélo (à assistance électrique ou non), comme cela se développe déjà rapidement en ce moment.

Le développement de ce type de service bénéficierait aussi aux personnes à mobilité réduite, en leur simplifiant les achats. Une trop forte généralisation des livraisons à domicile aurait cependant tendance à faire perdre le lien social permis par les achats de proximité, et pourrait jouer en défaveur des commerces de proximité.

Ces considérations touchant à des valeurs dépassant les seules considérations de transport pour prendre en compte les **interactions sociales de la mobilité** sont abordées par les scénarios accordant une place importante à la sobriété (Proximobilité SNCF, scénario de sobriété dans SNCF longue distance, négaWatt, SOB dans ANCRE, Hestia dans Enerdata-LET). Par exemple le scénario SOB de l'ANCRE avance que « les productions locales sont privilégiées », tendance que l'on retrouve dans le scénario de Proximobilité de la SNCF où il y aurait une « volonté de prendre le temps et d'investir la proximité » accompagné par des « choix radicaux de changement de vie » et s'appuyant notamment « sur les nouvelles technologies de l'information et des communications ».

Ces changements dans les valeurs et les comportements pourraient finalement être un puissant levier pour réduire le transport de marchandises, bien qu'il soit peu cité dans les études. Par exemple, en 2014, le transport de produits agricoles et agroalimentaires représente 48,5 Mds de t-km, soit 30% du transport intérieur sous pavillon français (CGDD, 2015) ; un fort développement de la « consommation de produits issus de l'agriculture locale » (Proximobilité, SNCF) pourrait faire baisser sensiblement ce chiffre tout en développant l'agriculture et l'emploi local.

Enfin, cette tendance pourrait être accompagnée par les pouvoirs publics, le scénario SOB de l'ANCRE allant jusqu'à imaginer des « **incitations économiques à la sobriété** » (ANCRE, 2013).

3.1.2. Choix modal : des reports modaux importants indispensables

Dans l'ensemble des scénarios, des efforts sont réalisés sur les choix des modes de transport, afin de passer à des modes partagés et/ou plus sobres en énergie. Pour faire simple, l'équation du report modal consiste essentiellement à :

- ✓ Pour le transport de voyageurs (Figure 20), passer autant que possible de l'avion et la voiture vers les transports en commun (train, métro, bus, car, etc.) et les modes actifs (vélo et marche) ;
- ✓ Pour le transport de marchandises (Figure 21), réduire la part des poids-lourds au bénéfice du fret ferroviaire et fluvial.

Les objectifs de reports modaux peuvent être atteints grâce à la mise en place d'une fiscalité avantageuse aux transports décarbonés, à l'amélioration de l'offre notamment pour les transports en commun surtout via le développement des infrastructures et des services aux voyageurs, et enfin via les changements de comportements espérés des usagers.

3.1.2.1. La tarification et la fiscalité carbone

De nombreux scénarios prévoient une trajectoire d'évolution du **prix du carbone** ou un prix du carbone en 2050 (DGEC, SNCF longue distance, ANCRE, CIRED-RAC, CGPC notamment). Les montants de taxe peuvent atteindre plusieurs centaines d'euros la tonne de CO_2 en 2050, avec notamment 300€ pour les scénarios de sobriété et de nouvelle gouvernance européenne de SNCF longue distance, 200€ pour le scénario SOB de l'ANCRE, 300€ pour le scénario du CIRED-RAC où la mesure est considérée comme « l'une des plus emblématique du scénario » en raison de son fort impact, tandis que dans le scénario Chronos d'Enerdata-LET le renchérissement du coût de la voiture est cohérent avec une valeur de la taxe carbone de 350 €/tCO_2 (Lopez-Ruiz, 2009). De même, l'évaluation macroéconomique des visions de l'ADEME introduisent une taxe qui atteint 325 €/tCO_2 en 2050 (ADEME, 2013a).

Bien que paraissant élevées, ces valeurs sont en cohérence avec les valeurs tutélaires du carbone préconisées par le rapport Quinet, qui recommande de prendre pour 2050 une valeur d'environ 200 €, entre 150 et 350 € (CAS, 2008). Pour rappel, la contribution climat-énergie dans la loi de finances 2016 est de 22 € et il est prévu qu'elle augmente à 30,50 €/tCO_2 en 2017 (Assemblée nationale, 2015). La trajectoire préconisée par le rapport Quinet prévoit de monter ce montant à 56 € en 2020 et 100 € en 2030, puis de croître au taux d'actualisation de 4% après 2030.

Autre élément de comparaison, le niveau de taxe qui pèse actuellement sur les carburants (via la taxe intérieure sur les produits énergétiques ; TICPE) revient à un taux implicite de taxe de 243 €/tCO_2 pour l'essence et 157€/tCO_2 pour le diesel (ADEME, 2013a).

Les revenus de la taxe carbone sont redistribués aux ménages pour les scénarios de l'ADEME et du CIRED-RAC, sous forme de chèque vert. L'étude du CIRED-RAC a également testé l'impact macroéconomique d'un recyclage pour subventionner les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, ainsi qu'une baisse des charges pesant sur le coût du travail. Ces revenus peuvent également servir à l'échelle des transports pour les investissements dans les infrastructures et les services des moyens de transport décarbonés.

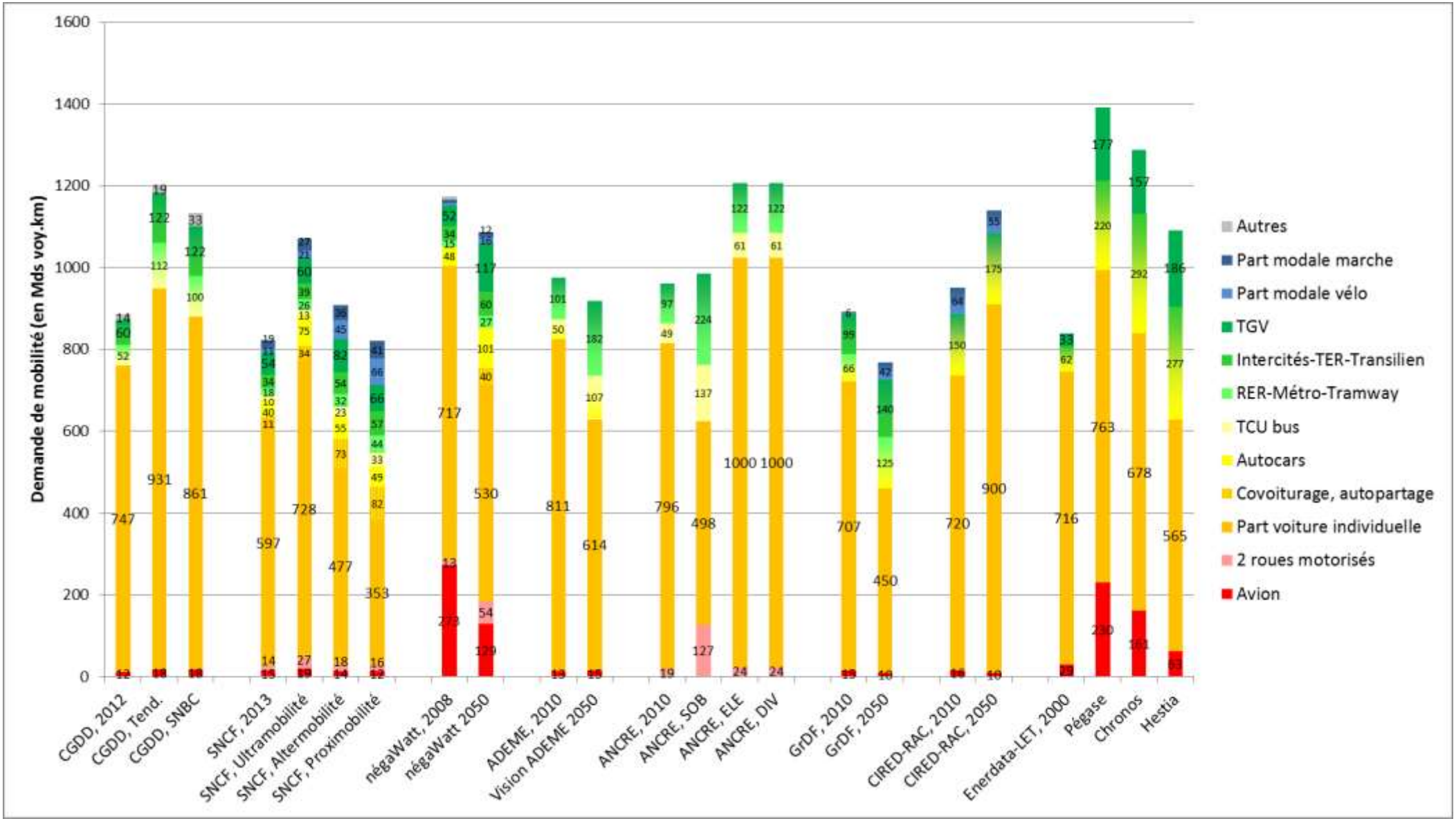


Figure 20 : Demande de mobilité et parts modales des différents moyens de transport de voyageurs dans les scénarios où les données étaient disponibles

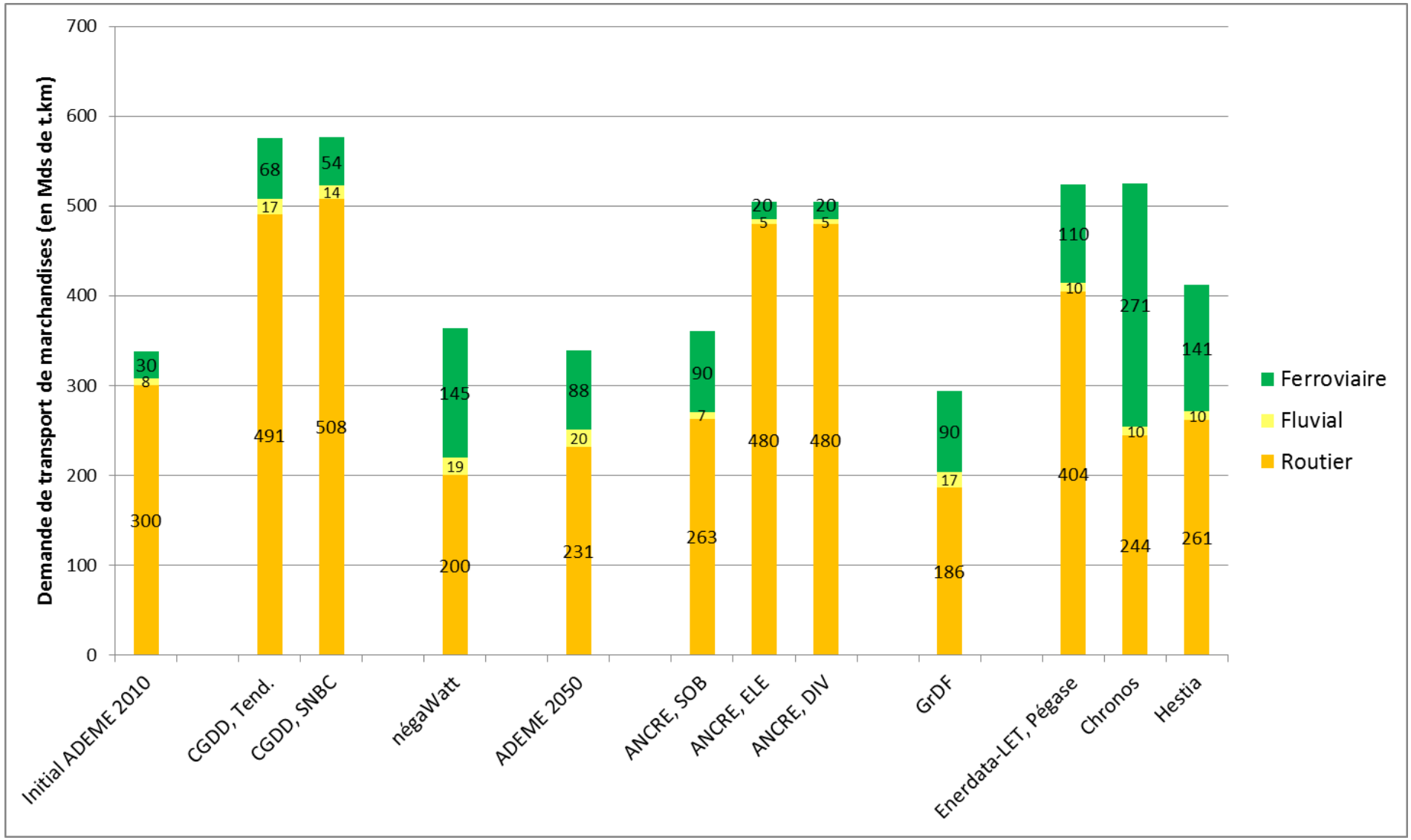


Figure 21 : Demande de transport de marchandises et parts modales dans les scénarios où les données étaient disponibles

Concernant l'**aviation**, le scénario acceptable du CIRED-RAC prévoit une taxe sur le kérosène à partir de 2012, et d'un montant de 400 €/tep, ce qui revient à 130 €/tCO_2. L'étude d'Enerdata-LET prévoit pour sa part la mise en place d'un système de permis d'émissions négociables (PEN) pour l'aviation, qui compte pour 18% de l'impact des politiques publiques sur les réductions d'émissions de CO_2 (hors effets technologiques sur les moteurs ; Lopez-Ruiz, 2009). Enfin, le scénario négaWatt prévoit une taxation de l'aérien sans en préciser le montant, l'avion étant « fortement découragé » et réservé à un usage d'exception. Au vu de l'augmentation de ce mode de transport et les fortes émissions qui y sont associées, de fortes contraintes sur ce mode de transport sont nécessaires pour atteindre le facteur 4. En effet, (+168% de trafic entre 1990 et 2013, pour des émissions qui ont augmenté de 13,3 à 21,3 MtCO_2, soit +60%, trafic international compris (DGAC, 2016), et un aller-retour Paris-New York représente 1,169 tCO_2, soit l'équivalent de plus de 10% du bilan carbone annuel d'un français (DGAC, 2016 ; MEDDE, 2015a).

Une des possibilités serait de supprimer les exonérations de taxes sur l'énergie (TICPE) dont bénéficie le kérosène ainsi que les taux de TVA réduits sur les billets d'avion domestiques. Ces exonérations ont représenté pour l'Etat un manque à gagner de 4,6 à 5,5 milliards d'euros sur la période 2008-2011. Une fin progressive des exonérations de TICPE entre 2015 et 2018 permettrait des recettes de 1,3 à 1,6 Mds€ pour l'Etat, une baisse des émissions du transport aérien intérieur de 20 à 27% en 2018 comparé au scénario de référence, et l'effet net sur l'emploi pourrait être positif en cas de réallocation des recettes pour stimuler le marché du travail (CE Delft, 2015).

Enfin, pour le **transport de marchandises**, la redevance kilométrique pour les poids-lourds est préconisée notamment par les scénarios du CIRED-RAC et de négaWatt. De même que pour le transport de voyageurs, les recettes de taxe poids-lourds pourraient être affectées en subventions pour encourager le fret ferroviaire et fluvial, comme cela était prévu dans le projet d'écotaxe finalement abandonné en 2014. Enfin, négaWatt cite le retour d'expérience allemand où la redevance kilométrique avait aussi un effet sur le taux de remplissage des poids-lourds, les transports ayant un intérêt supplémentaire à optimiser le taux de charge quand la redevance est la même que le camion circule à pleine charge ou à vide.

La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixe comme objectif pour 2030 d'avoir 20% du fret qui soit non routier, grâce à un report modal vers le ferroviaire et le fluvial. De plus, le taux de remplissage moyen des poids-lourds devra passer de 7 tonnes en 2010 à 8,7 tonnes en 2035 (MEEM, 2016b).

3.1.2.2. Le développement des infrastructures et des services

Etant donné les reports modaux importants prévus dans les scénarios les plus volontaristes, des infrastructures et des services supplémentaires doivent être développés.

C'est le cas notamment pour le domaine des **transports en commun**, et notamment le mode ferroviaire, dont les trafics TGV sont multipliés par 2 dans les scénarios du CGDD, plus de 2 dans le scénario négaWatt, +52% pour le scénario d'Altermobilité de la SNCF, et une multiplication par 5,6 entre 2000 et 2050 pour le scénario Hestia d'Enerdata-LET (Figure 20).

Ainsi le scénario négaWatt précise que « de nouvelles lignes à grande vitesse sont envisagées », afin de faire face à cette hausse de la demande, et notamment pour récupérer les trafics du mode aérien et une partir du mode routier. De même pour l'ensemble du transport ferroviaire, le scénario de sobriété de l'ANCRE prévoit plus qu'un doublement du trafic des trains, tandis que la vision 2050 de l'ADEME prévoit une augmentation légèrement supérieure à 80%. Au final, tous les scénarios permettant d'atteindre le facteur 4 prévoient une augmentation des transports ferroviaires de voyageurs de +24 % (scénarios ELE et DIV de l'ANCRE) à une multiplication d'environ 3,5 entre le début de la décennie 2010 et 2050 (pour le scénario Hestia qui atteint 186 Mds v-km en 2050 ; Figure 20). De la même manière, des progressions importantes sont prévues pour les autres transports en commun que sont les autocars et les bus, et la part généralement fortement croissante du fret ferroviaire (Figure 21) appelle à des investissements nouveaux dans les transports.

Au total, des investissements importants sont nécessaires, que ce soit pour de nouvelles infrastructures ou pour améliorer la qualité de l'offre, et en particulier pour développer le mode ferroviaire (TGV, trains régionaux, nouvelles lignes de tramways, fret…) ou pour la création de lignes de bus à haut niveau de service (BHNS) en milieu urbain. Les investissements en infrastructures sont estimés à 6 milliards d'euros par an entre 2012 et 2030 (3 pour les transports urbains et 3 pour le transport ferroviaire) dans le scénario du CIRED-RAC, en abaissant de ce même montant les investissements dans le transport routier. Le scénario Négatep évalue à 200 milliards d'euros sur 40 ans les besoins pour les projets de transport contre 100 milliards dans le scénario *business as usual* (BAU), soit 5 milliards par an contre 2,5 milliards dans le scénario BAU. Ce même ordre de grandeur se retrouve dans la modélisation NEMESIS du scénario de la DGEC, qui prévoit des investissements d'environ 3 milliards d'euros par an dans le scénario de base (AME), et entre 4 et 6 milliards d'euros dans le scénario volontariste (AMS2).

Pour les déplacements de courte distance, **la marche et le vélo** sont amenés à fortement se développer. Malgré l'importance relativement marginale du vélo aujourd'hui en France avec une part modale de 2 à 3% (en nombre de déplacements) et une portée limitée en termes de distance, il suffit de se comparer avec d'autres villes et pays européens pour identifier les marges de progression possibles. Alors que les meilleures villes françaises atteignent une part modale de 8% pour les agglomérations de Strasbourg et La Rochelle (contre 1% pour Marseille, 2% pour Paris ou Lyon, 4 à 6% pour Rennes et Nantes), Berlin atteint une part modale de 13%, tandis que Copenhague et Amsterdam sont en tête avec des parts modales de l'ordre de 32 à 50% selon les sources (compilation des données d'après Héran, 2014 ; Razemon, 2014 ; ECF, 2016 ; FUB, 2016).

Les scénarios étudiés ne comptent pas toujours le vélo dans leur modélisation, passant éventuellement à côté de ses potentiels en termes de report modal (CGDD, DGEC, ANCRE, Enerdata-LET). Lorsqu'il est compté, il est parfois regroupé avec la marche dans la catégorie des modes actifs ou des transports non motorisés (SNCF où les détails sont indiqués dans les notes accompagnant l'étude, CIRED-RAC, GrDF). Dans les 3 études qui prennent en compte le vélo, les progressions sont fortes :

- ✓ Une multiplication par 4 pour l'ADEME, avec une part modale qui passe de 4% et 1% en milieu urbain et périurbain en 2010 à respectivement 15 et 7% en 2050;

- ✓ Environ une multiplication par 3 pour négaWatt (de 6 à 16 Mds de v-km, soit 1,5% des v-km au total, et 3,3% pour la mobilité régulière et locale) ;
- ✓ Une multiplication par 6 dans le scénario de Proximobilité de la SNCF (de 11 à 66 Mds v-km, soit 8% des v-km au total en 2050).

En plus d'être un mode fiable et rapide pour les déplacements urbains compris entre 500 mètres et 10 kilomètres, le vélo présente aussi de nombreux atouts en termes d'externalités : il est très efficace énergétiquement, ne rejette aucun polluant, est silencieux, peu coûteux en infrastructures et pour l'usager, consomme très peu d'espace, et présente des bénéfices importants pour la santé (Razemon, 2016). Ainsi l'étude de la SNCF chiffre les externalités positives sur la santé (marche et vélo cumulés) du scénario Proximobilité à 131 milliards d'euros par an, contre 44 Mds € en 2013, permettant de contrebalancer largement les externalités négatives du scénario (accidents, congestion, pollutions locales et CO_2) qui s'élèvent à 28 Mds €.

De même, une étude du CGDD montre que le bilan socio-économique des politiques publiques en faveur du vélo est positif, en particulier lorsque l'offre de transports en commun s'adapte aux nouveaux comportements des usagers. A nouveau, la majorité des bénéfices pour la collectivité proviennent de l'amélioration de la santé des usagers du vélo (CGDD, 2016e).

Parmi les évolutions qui permettent d'encourager la pratique du vélo, sont notamment citées par les études le développement des aménagements cyclables, de lieux de stationnements, de systèmes de location à courte (dont les systèmes de vélos en libre-service, VLS), moyenne et longue durée, les incitations à l'achat de vélos à assistance électrique (VAE) la mise en place de l'indemnité kilométrique vélo ou l'intermodalité vélo-transports en commun. Il est possible d'ajouter également comme le suggère aussi la FUB l'instauration de zones 30 et d'une signalisation facilitant la circulation et assurant la sécurité des cyclistes, le développement des vélo-écoles et des ateliers de réparation, et une meilleure communication sur le vélo et ses bénéfices pour la santé (FUB, 2013).

Frédéric Héran montre que de nombreux facteurs peuvent être à l'origine du développement du vélo dans les villes et pays européens, au-delà des idées reçues estimant que le vélo ne serait adapté qu'aux pays nordiques pour des raisons de culture ou de sensibilité environnementale, ou qu'il n'est possible que là où le climat est clément et le relief plat (Héran, 2014). Par conséquent, rien n'empêche a priori la France à atteindre des parts modales comparables aux meilleurs pays européens dans les décennies à venir, à conditions qu'émerge une vraie volonté politique, une implication des collectivités, des entreprises, et les indispensables changements de comportement des usagers. De plus, la pratique du vélo est de retour en France depuis le début des années 2000, essentiellement dans les centres des grandes agglomérations, tandis qu'elle continue de diminuer dans les zones rurales et périurbaines (CGDD, 2010).

La programmation pluriannuelle de l'énergie vise d'ailleurs un fort développement du vélo : « La part des modes doux (marche et vélo) qui était en 2008 de 2,7 % (en nombre de déplacements dans les transports de courte distance) vise à atteindre 12,5 % en 2030 » (MEEM, 2016b). Ces chiffres portent à confusion puisque c'est la part du vélo seul qui était de 2,7% en 2008 (et 22,3% pour la marche ; CGDD, 2010), l'objectif de 12,5% pour 2030 concerne peut-être donc également le vélo seul.

3.1.2.3. L'information du public et les changements de comportement

Le report modal des voyageurs peut-être fortement **influencé par les pouvoirs publics**, via des contraintes ou des incitations financières, le développement des infrastructures et de l'offre, il n'en reste pas moins que la répartition modale est aussi le résultat de la somme des choix et comportements des usagers des transports. Ces changements peuvent être encouragés par les pouvoirs publics et les autres acteurs par de simples campagnes d'information ou de sensibilisation du public.

En effet, bien qu'il soit généralement considéré que les individus sont parfaitement rationnels dans leur choix et choisissent leur mode de transport selon leur performance fonctionnelle (coût, temps, fiabilité, accessibilité), il s'avère que cette performance ne distingue cependant pas les usagers des transports en commun de ceux de la voiture particulière (Brisbois, 2010). En fait, les bénéfices symboliques et affectifs de la voiture (confort, agrément, représentation sociale de soi, évitement de la mixité) et les bénéfices d'utilité à l'avantage des TC peuvent jouer un rôle important dans le choix modal. En raison de l'habitude, ces choix deviennent inconscients et ne s'adaptent pas automatiquement à des variations de l'offre, et la contrainte peut même favoriser l'opposition au changement.

Dans ce contexte, des stratégies orientées vers l'influence des processus cognitifs et comportementaux peuvent avoir une influence sur les choix sans modification de l'infrastructure et du service rendu. Ces stratégies peuvent se traduire par une amélioration de l'information, l'augmentation du sentiment de liberté de choix, ou en valorisant la performance symbolique et affective des transports en commun ou des modes actifs (Brisbois, 2010). De même, rompre avec l'habitude des usagers peut se provoquer via l'encouragement des premières expériences (d'un trajet en transport en commun, en vélo, d'autopartage, etc.) ou via le marketing individualisé visant à « accompagner l'usager dans la démarche de connaissances et d'expériences des diverses alternatives » (Rocci, 2015).

Des stratégies de type *« green nudge »* pourraient également être mises en place, afin d'encourager les usagers aux changements de comportement, et faire passer ce qui reste souvent des déclarations de bonnes intentions en véritables actions (Singler, 2015). Car de nombreuses aspirations des français (enquête SNCF, 2016) pourraient aller dans le sens de la transition énergétique, à condition d'être encouragées par les pouvoirs publics, que ce soit l'aspiration vers une pratique plus soutenue du vélo (à part pour les plus de 65 ans) et du covoiturage, ou les aspirations vers un logement situé dans un environnement de vie calme avec des moyens de transport en commun et des commerces à proximité.

Cette possibilité est pourtant relativement peu citée parmi les mesures possibles des scénarios étudiés. Cependant, dans l'étude de la SNCF, les scénarios Altermobilité et Proximobilité suggèrent parmi les mesures de « communiquer sur les vertus santé de la pratique des différents modes alternatifs » et de « développer des solutions de management de la mobilité et de la pollution à un niveau individuel et collectif basées sur les données réelles ». De même, l'étude d'Enerdata-LET identifie des mesures regroupées sous le terme de « Politiques orientées vers les styles de vie ». Cependant, les 3 sous-catégories, l'« info au public », les « patrons de comportement » et les « Télécom » ne participent au maximum qu'à 7% de l'impact des politiques publiques sur la réduction des émissions (Figure 56).

3.1.3. Partage et taux de remplissage des véhicules : ils doivent poursuivre leur forte progression

La mobilité en véhicule particulier aujourd'hui est généralement réalisée à l'aide d'un véhicule possédé et avec un taux de remplissage très faible. Les tendances actuelles au développement du covoiturage et de l'autopartage (notamment entre particuliers) vont dans le bon sens pour que les véhicules et les trajets soient mieux partagés, et ainsi diminuer le parc de véhicules et le nombre de trajets.

3.1.3.1. Le covoiturage

Suivant une forte tendance actuelle, tous les scénarios prennent comme hypothèse que le covoiturage va poursuivre son expansion, participant ainsi à améliorer le **taux de remplissage moyen des voitures** et améliorant ainsi l'efficacité énergétique par passager. Cependant, les éléments chiffrés sur la progression du covoiturage sont plus rares, et sont surtout difficilement comparables entre eux en raison des terminologies différentes et des valeurs hétérogènes sur le taux de remplissage moyen des véhicules aujourd'hui :

- ✓ Dans l'étude du CGDD, le taux d'occupation augmente de 20% en 2050 par rapport au cadrage tendanciel. Une évaluation de l'impact du covoiturage montre que le covoiturage représente aujourd'hui 1,6% de part de marché de la longue distance (3,5 Mds v-km), et pourrait passer à une part entre 2,8 et 3,7% en 2030 comme en 2050 (10 Mds v-km en 2030 dans l'hypothèse haute) ;
- ✓ L'étude facteur 4 de la SNCF considère un taux d'occupation qui passe de 1,44 en 2013 à 1,49 en 2050 (calcul à partir des données de la note Transmissions, 2015). De même, les trajets partagés passent de 4,5 Mds v-km en 2013 (0,7% des v-km de la voiture) à 41,1 Mds v-km en 2050 dans le scénario Proximobilité (soit quasiment 10% des v-km de la voiture, et seulement 2,4% dans le scénario d'Ultramobilité ; Transmissions, 2015) ;
- ✓ Le scénario négaWatt prévoit une augmentation du taux de remplissage moyen des voitures individuelles de 1,8 à 2,4, avec une décomposition par type de mobilité et notamment un passage de 1,4 à 2,0 pour la mobilité régulière et locale. Le scénario introduit également des taxis collectifs, qui correspondent à des véhicules de type minibus, qui représentent 3,7% de la mobilité en 2050. Pour les autobus et autocars, les taux de remplissage passent de 33% en moyenne en 2008 à 50% en 2050. Par ailleurs, les taux de remplissage des véhicules non routiers n'ont pas été modifiés, « par manque de données mais surtout par prudence » ;
- ✓ Le scénario de l'ADEME ne détaille pas de chiffres spécifiques au covoiturage mais le scénario développe fortement les véhicules serviciels (voir autopartage ci-dessous). Dans la vision 2030, il est prévu un accroissement du taux de remplissage des transports collectifs de +30 à 50%, notamment en dehors des périodes de pointe ;
- ✓ Sans donner de chiffres, l'étude de GrDF indique que « la mutualisation des moyens de transport voyageurs est le premier facteur de baisse des consommations finales » (GrDF, 2013a) ;
- ✓ Enfin, l'étude du CIRED-RAC prévoit que le taux de remplissage des voitures en zone urbaine passera de 1,25 à 1,5 d'ici à 2050.

La diversité des chiffres et le fait que le phénomène des plateformes de covoiturage est récent et en croissance rapide, complique à la fois la comparaison des chiffres entre les études et une prospective fiable sur ce domaine. Aujourd'hui le site de BlaBlaCar est en quasi-monopole sur le secteur du covoiturage, et le succès est essentiellement marqué pour le covoiturage longue distance. Mais de nombreuses plateformes concurrentes et en particulier des plateformes dédiées au covoiturage courte distance et/ou pour les trajets journaliers voient le jour. De même, les nouvelles technologies de l'information permettent de développer des modèles hybrides entre le covoiturage et l'autostop, en permettant de covoiturer de manière plus flexible ou en instantané.

Les chiffres de taux d'occupation des véhicules sont encore lacunaires selon la note de Transmissions, qui signale que les comptes des transports annuels calculent en fait les chiffres du nombre de voyageurs-kilomètres au niveau national en multipliant les chiffres des véhicules-kilomètres par un taux d'occupation des véhicules constant au cours du temps, à 1,8271. En réalité, ce taux d'occupation n'est pas constant et il est également surestimé, Transmissions avançant les chiffres de 1,57 en 1994 et 1,47 personne par voiture en 2008, d'après les 2 dernières ENTD (Transmissions, 2015). Ainsi l'étude de la SNCF prend en compte un chiffre de 1,44, qui tend à rendre le nombre de voyageurs-kilomètres en 2013 moins élevé que pour les autres études (voir notamment Figure 20).

Il serait intéressant dans un premier temps d'améliorer cette méthodologie de calcul, afin d'avoir des données plus cohérentes et partagées, et afin de pouvoir évaluer l'évolution du covoiturage et ses implications pour l'organisation des transports et ses émissions. De même, le taux de remplissage est une donnée utile pour décomposer les consommations énergétiques et les émissions selon différents critères (voir notamment Figure 18 ; Carbone 4, 2014), il serait pertinent d'utiliser ce critère unifié dans les différents scénarios à l'avenir.

Le développement du covoiturage a cependant un **impact incertain sur les émissions**. Le covoiturage a bien évidemment un effet positif dans le sens où il permet d'augmenter le taux d'occupation des véhicules, et permet donc de faire voyager autant de personnes (nombre de voyageurs-kilomètres constant) pour une consommation de l'espace, d'énergie ou encore d'émissions de CO_2 inchangés (car le nombre de véhicules-kilomètres baisse).

Cependant, son impact marginal doit se mesurer en fonction de ce qui se serait passé si le covoiturage n'existait pas. Selon les données de l'étude réalisée en 2015 par IFOP pour la SNCF, parmi les personnes qui utilisent le covoiturage, 52% des interrogés auraient pris le train si le covoiturage n'existaient pas, 34% auraient voyagé seul en voiture et 13% auraient renoncé à leur voyage (1% de raisons autres). Ainsi les effets ne sont pas forcément très positifs sur les émissions dans ces conditions, le train ayant des émissions bien plus faibles que la voiture, même lorsque le trajet est partagé en covoiturage.

Malgré cela, le covoiturage peut être **encouragé par les pouvoirs publics** notamment dans les aménagements (voies dédiées, aires de stationnement et points de rencontre), en facilitant l'atteinte d'une taille critique via une meilleure information et une visibilité renforcée, en tentant de réduire l'émiettement de l'offre ou encore en développant une approche multimodale des apports du covoiturage (Cerema).

3.1.3.2. Le taux de remplissage du transport de marchandises

Comme certains exemples l'ont montré, le taux de remplissage ne s'applique pas qu'aux véhicules individuels, mais aussi aux transports en commun, et au transport de marchandises. Sur ce dernier secteur, les études détaillent rarement les progrès réalisés ni les moyens pour y arriver, pourtant les progrès potentiels sont importants, le taux de remplissage étant par exemple **estimé à 50%** seulement à l'échelle européenne (European Commission, 2016). La taxe sur les poids-lourds serait un des outils important, encourageant ainsi à une amélioration dans l'emport et la logistique du fret, par exemple par un basculement des logiques actuelles du juste à temps et du toujours plus flexible (ADEME).

Dans le scénario volontariste SNBC du CGDD, les progrès logistiques permettent d'atteindre un emport moyen de 12,1 t/PL contre 11,2 t/PL dans le cadrage tendanciel. Les progrès sont encore plus forts pour le scénario négaWatt, qui prévoit une augmentation du taux de charge de 40% pour les poids-lourds entre 2012 et 2050, et de 30% pour les tracteurs routiers.

3.1.3.3. L'autopartage et les services de mobilité

De manière identique au covoiturage, les **définitions de l'autopartage** entre les études diffèrent, et se recoupent parfois avec celles du covoiturage. Ainsi les chiffres sont difficilement comparables entre eux, mais toutes les études les plus récentes semblent voir une augmentation de la tendance à l'autopartage, que ce soit entre particuliers, par la location, les taxis collectifs ou les véhicules serviciels (en particulier pour les scénarios SNCF, négaWatt, ADEME et ANCRE) :

- ✓ L'essor de l'autopartage type Autolib' dans le scénario AMS2 de la DGEC facilite la progression des flottes de véhicules hybrides et électriques ;
- ✓ Dans l'étude de la SNCF, le véhicule partagé (location, autopartage) passe de 6,9 Mds v-km en 2013 (soit un peu plus de 1% des trajets en voiture) à des chiffres équivalents au covoiturage, soit 41,1 Mds v-km dans le meilleur des scénarios ;
- ✓ Pour le scénario négaWatt, les taxis collectifs peuvent être classés à la fois dans du covoiturage ou de l'autopartage ;
- ✓ L'ADEME accorde une grande importance à ce qui est appelé les véhicules serviciels, qui représentent 30% de la mobilité urbaine, 20% en périurbain et 15% pour la longue distance en 2050. L'usage du moyen de transport prend le dessus sur la possession, ce changement de paradigme participant ainsi à la forte réduction du parc de véhicules de 35 à 22 millions de véhicules ;
- ✓ Les services de mobilité se développent également dans le scénario SOB de l'ANCRE, le changement de rapport à la voiture permettant une adaptation du véhicule au type de déplacement et une diminution de 40% de la flotte de véhicules.

Le **fort potentiel** de l'autopartage et en particulier des véhicules partagés de transport à la demande a été illustré par une étude de l'ITF, qui a modélisé l'impact du remplacement de tous les trajets urbains en voiture particulière et en bus par une mobilité à la demande assurée par des taxis partagés et des taxis-bus. Les résultats montrent que « la congestion a

disparu, les émissions dues au trafic sont réduites d'un tiers, et le stationnement public nécessite 95 % d'espace en moins. Le parc automobile requis n'atteint que 3 % de la taille du parc actuel », et « même sans subvention, le prix d'un trajet en ville pourrait descendre à 50 % ou moins du prix d'un trajet effectué aujourd'hui ». Enfin, l'amélioration de l'accès au service et de l'inclusion sociale est forte, puisque « les inégalités d'accès aux emplois, aux écoles ou aux services de santé en milieu urbain ont presque totalement disparu » (ITF, 2016).

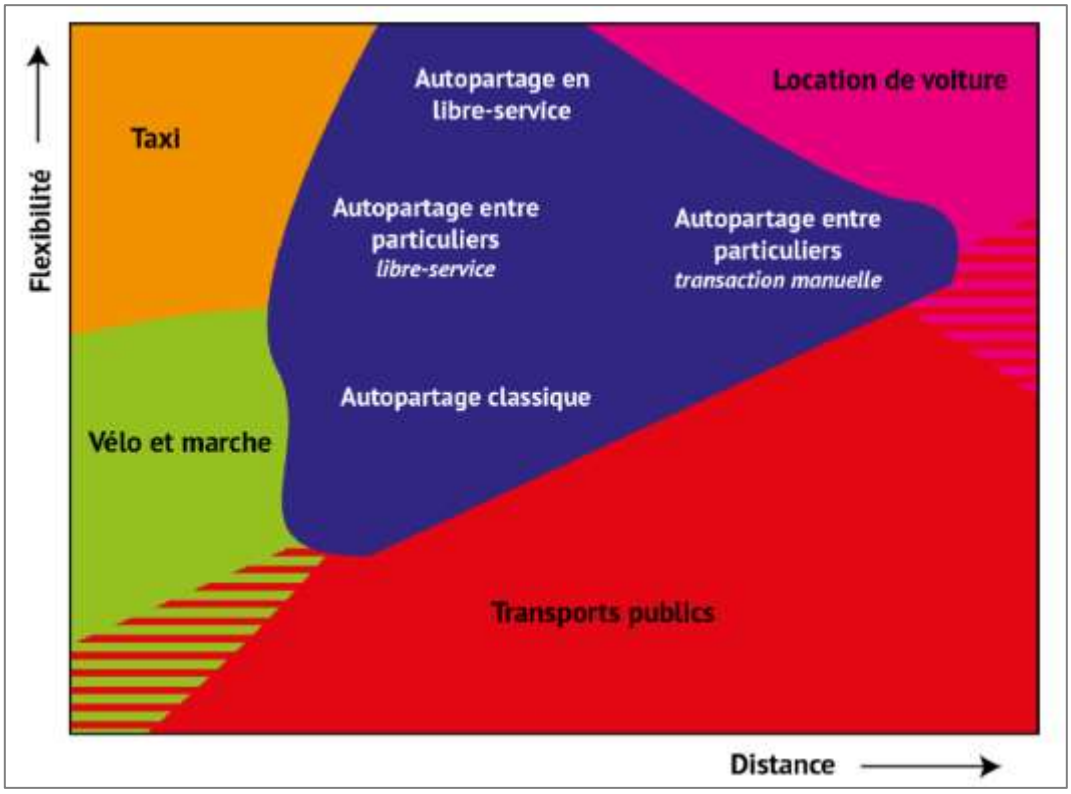


Figure 22 : La complémentarité des offres d'autopartage avec les autres offres de transport (ADEME, 2015b)

Cependant, il faut garder en mémoire que l'autopartage a un impact important sur la durabilité du système de transport que s'il permet de réellement modifier les pratiques de mobilité et notamment de permettre une **diminution du parc de véhicules**. En effet, une enquête commanditée par l'ADEME sur l'autopartage entre particuliers ne montre pas d'évolution significative du taux d'équipement en véhicule des usagers, ni sur leurs pratiques de mobilité ou le nombre de kilomètres parcourus en voiture. Les résultats de ce phénomène récent pourraient cependant produire des effets seulement à plus long terme (ADEME, 2015b).

Pour encourager l'autopartage, une note de la Fabrique écologique propose d'étudier la possibilité de faire passer la fiscalité de l'automobile d'une fiscalité de l'achat et de l'usage à une **fiscalité de la possession**. L'idée de ce bonus-malus écologique ou des incitations fiscales mises en place par les collectivités locales, serait ainsi de pénaliser la propriété d'un véhicule peu ou mal utilisé, et encourager la copropriété d'un véhicule ou à se séparer de son propre véhicule (La Fabrique Ecologique, 2016).

3.1.4. Efficacité énergétique : des progrès à continuer

Du côté des innovations majoritairement technologiques, des progrès sont à réaliser sur les consommations énergétiques par v-km ou t-km pour tous les modes de transport. Ces gains représentent d'ailleurs la majorité des réductions des émissions dans les scénarios tendanciels. Cependant, des politiques volontaristes peuvent permettent d'aller au-delà des projections tendancielles de progrès techniques, que ce soit au niveau de la gestion du trafic ou de l'écoconduite des véhicules.

3.1.4.1. Les réductions de consommations unitaires

L'ensemble des scénarios prend des hypothèses de réduction des **consommations énergétiques** unitaires des véhicules, mais avec des chiffres et des unités différentes ce qui limite à nouveau leur comparabilité. Les chiffres donnés concernent le plus souvent les véhicules individuels, mais ils concernent parfois aussi les gains d'efficacité pour l'avion, les poids lourds ou plus rarement les transports ferroviaires :

- ✓ L'efficacité est souvent mesurée comme un pourcentage de réduction des consommations par véhicule-kilomètre : par exemple -30 à -40% pour les véhicules individuels dans Négatep contre -50 à -55% selon les scénarios de l'ANCRE, -25% pour l'avion dans négaWatt contre -30% entre 2010 et 2050 dans l'étude d'Enerdata-LET et -50% dans le scénario de Greenpeace (d'après une étude d'Akerman de 2005), ou encore -30% pour le ferroviaire grâce au remplacement du parc roulant dans le scénario de l'ADEME ;
- ✓ Dans d'autres cas ce sont les consommations en litres ou kilowattheures pour 100 kilomètres, qui sont données pour l'année de référence et l'horizon : passage de 6,9 à 3,2 L/100km pour la voiture individuelle dans le scénario négaWatt, consommation de 1 L/100km en 2050 pour Greenpeace, ou encore 12,75 kWh/100km pour les véhicules électriques dans la vision 2050 de l'ADEME ;
- ✓ Enfin, les évolutions sont parfois exprimées directement en gCO_2/km, reflétant ainsi à la fois les progrès sur les consommations énergétiques et sur les carburants utilisés : c'est le cas de l'étude du CGDD qui prévoit une évolution d'une moyenne de 159 gCO_2/km en 2012 à 62,5 en 2050, sauf pour la courte distance dans le scénario volontariste, où les rejets descendent à 30gCO_2/km en raison du développement du véhicule électrique. Pour l'étude de la SNCF, tous les scénarios prennent l'hypothèse d'un passage de 141 à 62 gCO_2/km, tandis qu'Enerdata-LET retient une valeur de 46 gCO_2/km en 2050.

Bien que ces évolutions semblent souvent être prises comme des hypothèses exogènes aux scénarios, les **pouvoirs publics** ont également un rôle à jouer comme ont pu le montrer l'introduction du bonus-malus en France ou les normes européennes sur les émissions des véhicules. Ainsi les études du CGPC et de la SNCF préconisent une action normative renforcée sur les émissions des véhicules.

De plus, la technologie hybride est fortement développée dans les scénarios d'Enerdata-LET, permettant des réductions des consommations énergétiques dont l'impact compte pour plus de 50% des réductions des émissions de CO_2.

3.1.4.2. Sobriété et modération dans l'usage des véhicules

En 50 ans, entre 1961 et 2011, le **poids moyen du véhicule** particulier est passé de 758 à 1266 kg (+67%) tandis que sa puissance a été multipliée par 2,7 (passage de 39 à 106 chevaux ; Figure 23), lui permettant en général de transporter 4 à 5 personnes, avec une vitesse maximale de 182 km/h (L'Argus, 2015). Pourtant une grande partie des usages de la voiture correspond à de courts trajets urbains à une vitesse de 50 km/h maximum, avec une personne souvent seule dans la voiture (le taux de remplissage est plus faible en urbain que pour la longue distance). Ainsi, cette incohérence d'un point de vue notamment énergétique peut amener à imaginer des véhicules urbains plus légers, moins puissants, et avec éventuellement moins de sièges. C'est ce que préconisent notamment les scénarios négaWatt, Greenpeace, le scénario SOB de l'ANCRE avec de petits véhicules électriques de ville, ou l'ADEME qui préconise le juste dimensionnement du véhicule pour son usage.

Sans besoin de progrès technique, les émissions de CO_2 se trouveraient fortement réduites, une réduction de 10% du poids entrainant une baisse de consommation et des émissions de 6 à 7% (RICARDO-AEA, 2015). Ainsi, une voiture microcitadine thermique émet 3,5 fois moins de CO_2 qu'un monospace et quasiment 2,5 fois moins qu'une berline. Et sur le cycle de vie d'une voiture, la microcitadine thermique sera moins émettrice que la berline électrique (David, 2012 ; Figure 24).

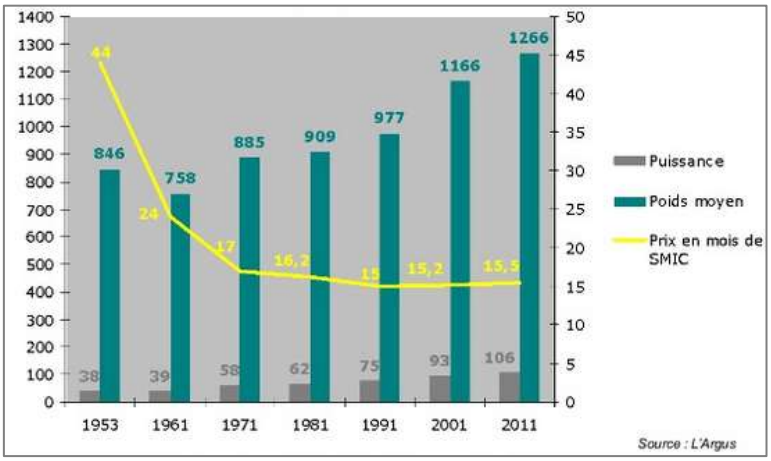


Figure 23 : Evolution de la puissance, du poids et du prix du véhicule particulier de 1953 à 2011 en France (Meilhan, 2016)

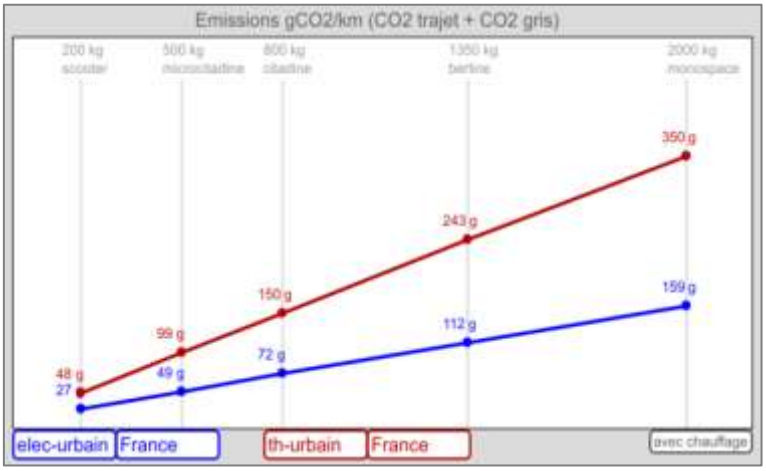


Figure 24 : Emissions totales de CO_2 en fonction du poids, pour un véhicule électrique (mix France 2010) et un véhicule thermique (David, 2012)

Un autre moyen encore plus facile de baisser les consommations est de **réduire les vitesses sur les routes**, profitant à la fois à la sécurité routière et aux baisses des consommations, ce que prévoient les scénarios de négaWatt, le scénario AMS2 de la DGEC et la SNCF. Etant donné que la consommation de carburant est minimale entre 65 et 85 km/h (Figure 25), des réductions de vitesse notamment sur les routes les plus rapides peuvent avoir un impact conséquent. Le scénario négaWatt enregistre ainsi une baisse des consommations d'énergie de 8% par rapport à l'évolution tendancielle, en faisant passer les vitesses maximales autorisées à 110 km/h sur autoroute, 100 sur les voies rapides et 80 sur le reste du réseau hors agglomérations.

Concernant les réductions à 30 km/h en ville (comme suggérées plus haut), l'impact positif est ailleurs. En évitant de plus fortes accélérations et freinages, il est probable que cela compense les consommations plus fortes pour une vitesse constante de 30 km/h par rapport à 50 km/h. Et le principal intérêt de la mesure réside plutôt dans la tranquillisation de la ville, et le report modal qu'elle encourage en sécurisant et donc en encourageant les modes actifs tout en pénalisant légèrement le temps de parcours des véhicules motorisés.

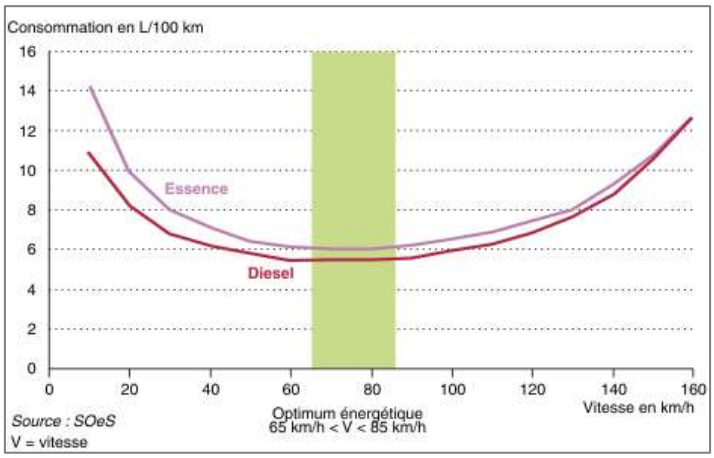


Figure 25 : Consommation en litres par 100 kilomètres suivant la vitesse en kilomètre par heure (INSEE, 2016c)

Enfin, l'amélioration de la **gestion du trafic** est citée dans le scénario Chronos d'Enerdata-LET, tandis que la sensibilisation ou la formation à l'**écoconduite** sont mises en avant par le scénario AMS2 de la DGEC et par les scénarios Altermobilité et Proximobilité de la SNCF.

L'ensemble des mesures citées dans les 4 parties précédentes permettent de faire diminuer la consommation d'énergie finale des transports en 2050 (Figure 26). Sur le graphique, une seule référence a été retenue en raison des valeurs relativement proches pour l'année de référence autour de 40-45 Mtep, bien qu'elles s'échelonnent de 36,5 Mtep pour l'ANCRE à 48,4 Mtep pour négaWatt (qui prend en compte l'aviation internationale). Les baisses de consommations entre l'année de référence et l'horizon sont de -42 à -57% pour les scénarios de l'ANCRE, de -49% pour Négatep et GrDF, -59% pour Greenpeace et jusqu'à environ -65% pour négaWatt et l'ADEME (Tableau 4).

Ainsi la dernière piste de réduction des émissions de CO_2 repose sur le mix énergétique utilisé dans les transports, avec pour objectif de passer d'une mobilité dépendante au pétrole à 92% en 2010 à des énergies décarbonées.

3.1.5. Choix des carburants : le besoin de diversification des sources d'énergie

Globalement, en 2050, les scénarios qui ont fait une évaluation du mix énergétique des transports prévoient un fort **remplacement du pétrole** qui représentent moins de la moitié du mix à part dans le scénario SOB de l'ANCRE (64%). Le scénario de l'ADEME prévoit même une indépendance complète vis-à-vis du pétrole. Les carburants alternatifs sont essentiellement les biocarburants, la motorisation gaz et la mobilité électrique, la technologie hydrogène étant très peu plébiscitée (Figure 26).

Les efforts de substitution sont essentiellement faits sur le transport routier, en particulier sur le parc de véhicules particuliers, et par effet d'entraînement sur les 2 roues motorisés, les transports en commun, ou les poids-lourds.

Tout comme la réduction des déplacements était dépendante de l'évolution de l'urbanisme et du secteur du logement, la dépendance aux autres secteurs énergétiques est ici très forte. En effet, la capacité de développement de certains carburants alternatifs (électricité, biocarburants, gaz naturel, biogaz, hydrogène) est fortement dépendante des ressources disponibles et/ou de la production d'énergie nationale, mais aussi des consommations absorbées par les autres secteurs énergétiques. Ainsi, le scénario de l'ADEME suppose par exemple que les progrès importants dans la rénovation des bâtiments permettront de libérer de la demande en gaz pour alimenter le secteur des transports.

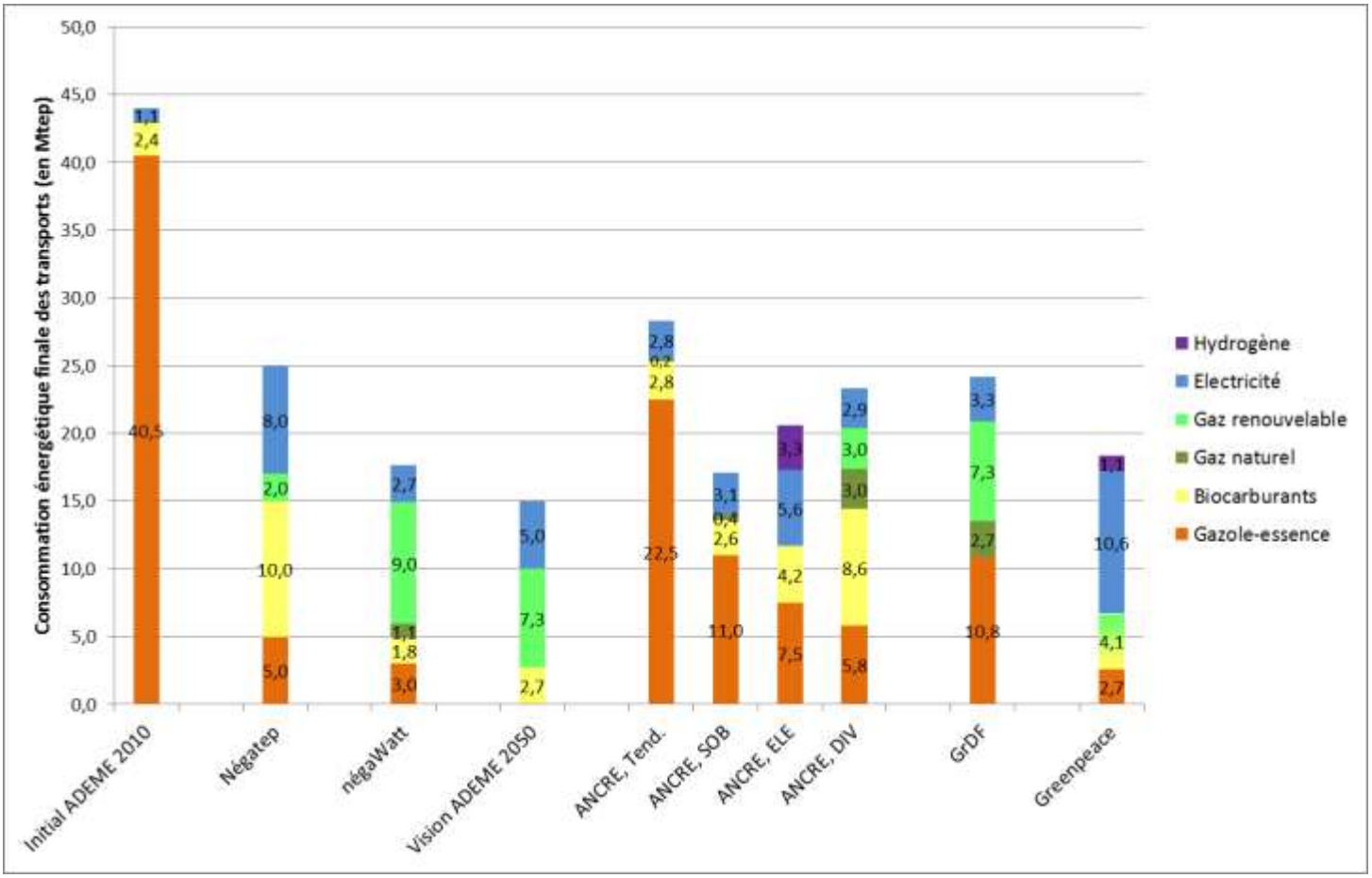


Figure 26 : Consommation énergétique finale des transports en 2050 et répartition par énergie dans les scénarios où les données sont disponibles

3.1.5.1. Développement des véhicules électriques

La mobilité électrique est aujourd'hui en plein développement, la croissance des ventes de véhicules électriques est très forte et les aides publiques pour encourager son développement sont de plus en plus fortes. Les ventes ont dépassé la barre des 20 000 ventes en 2015 (Actu-environnement, 2016a), pour représenter environ 1% des ventes, sa part dans le parc de véhicules particuliers étant encore plus faible.

Mais contrairement à ce qui aurait pu être attendu, le développement de la mobilité électrique reste relativement **modéré dans les scénarios**. Il atteint 58% dans le scénario de Greenpeace qui fait le pari de sortir du nucléaire tout en développant la mobilité électrique, 33% dans le scénario de l'ADEME, 32% pour Négatep, 27% pour le scénario d'électrification de l'ANCRE et respectivement 18% et 12% pour DIV et SOB, 16% pour négaWatt et 14% pour GrDF. De plus ces chiffres peuvent aussi refléter une croissance du ferroviaire, qui est essentiellement alimenté à l'électricité.

Le développement de la mobilité électrique se heurte en effet à plusieurs **obstacles et limites** pour un développement rapide et massif. Tout d'abord, l'autonomie limitée des véhicules électriques (VE) empêche un usage de ces véhicules sur les longues distances, et peut décourager les foyers à utiliser le VE comme seul véhicule. Leur coût d'achat plus élevé, notamment dû aux coûts de production de la batterie, rend leur développement dépendant des subventions publiques au moins dans un premier temps. Cela nécessite une vraie volonté politique pour développer les infrastructures de recharge et mettre en place des aides à l'achat. Aussi les impacts environnementaux sont plus importants que pour le véhicule thermique pour la fabrication, et la question de la disponibilité en métaux pour un fort développement de la mobilité électrique est notamment posée. Cela a notamment poussé le Jury de déontologie publicitaire (JDP) à considérer qu'une voiture électrique ne peut pas être qualifiée d'« écologique » ni de « propre » (LeMonde, 2014 ; voir Figure 27 pour les impacts du VE).

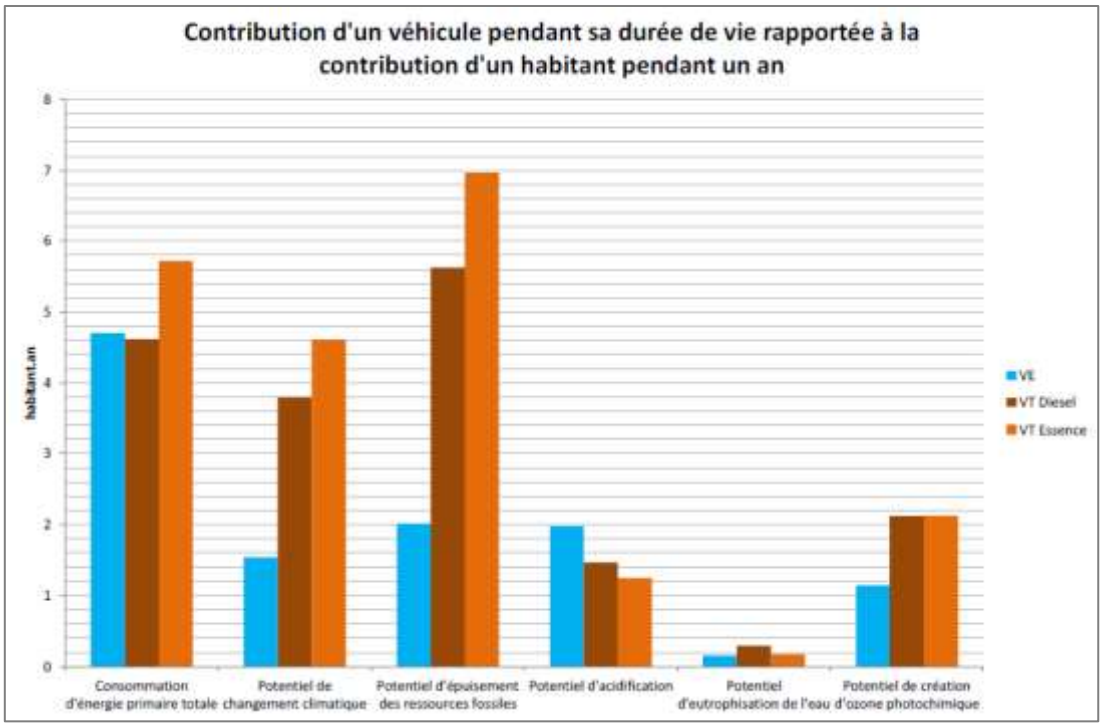


Figure 27 : Les six impacts potentiels retenus pour la VP en France en 2012 (ADEME, 2013b)

Sur le critère des émissions de CO_2, les émissions du véhicule électrique (VE) et du véhicule thermique (VT) sur un cycle de vie de 150 000 km sont respectivement de 9 et de 22 teqCO_2, donnant un avantage non négligeable au VE. Cependant, c'est la fabrication du VE qui représente la majorité de son impact (73%, quasiment 7 tCO_2), tandis que c'est la phase d'utilisation du VT qui représente 72% de son impact, alors que sa fabrication est moins polluante que le VE avec des émissions d'environ 4 teqCO_2. Mais pour le VE, son impact sur le cycle de vie dépendra fortement du mode de production de l'électricité consommée. Ainsi, avec le mix électrique allemand, les émissions de CO_2 seront à peine inférieures au VT sur le cycle de vie (Figure 28), tandis que le bilan serait assez largement défavorable pour les mix électriques chinois ou polonais très charbonnés. En prenant le mix électrique mondial moyen de 2010, le bilan sur le cycle de vie est très proche. En effet, serait équivalent pour une voiture citadine de 800 kg, à l'avantage du thermique pour des véhicules plus légers (48 gCO_2/km contre 72 pour le VE pour un scooter de 200 kg) et à l'avantage du VE pour les véhicules plus lourds (312 g pour le VE contre 350 pour le VT pour un monospace de 2 tonnes ; David, 2012). Un déploiement massif du véhicule électrique à l'échelle mondiale avec un mix électrique inchangé n'entrainerait donc aucun gain substantiel en termes d'émissions de CO_2.

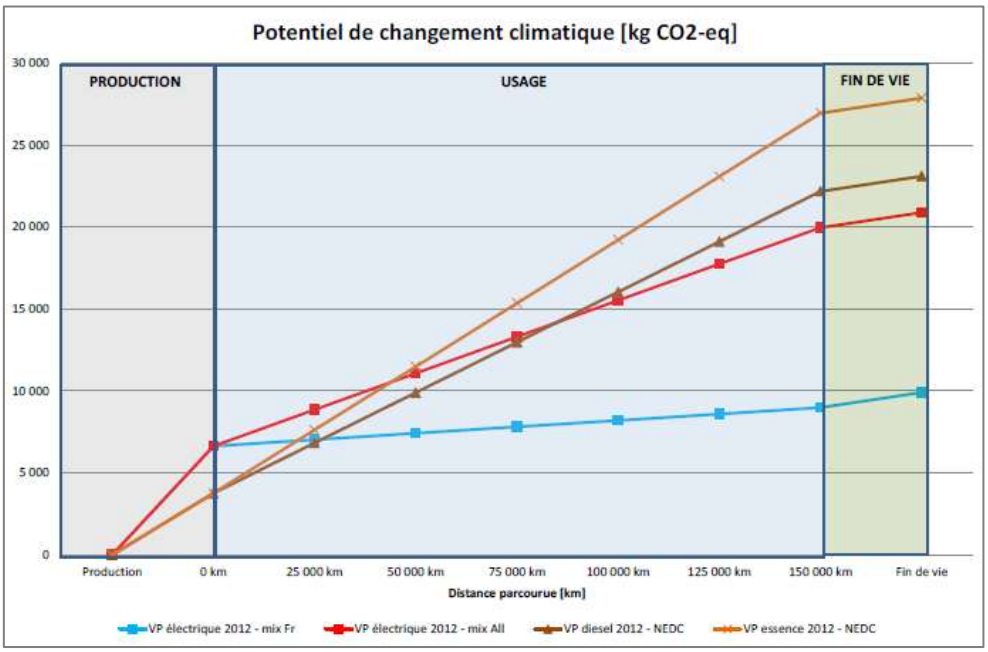


Figure 28 : Potentiel de changement climatique pour les véhicules électriques français et allemand et les véhicules thermiques essence et diesel en 2012 selon le scénario de référence (ADEME, 2013b)

Enfin, la question de l'échelle du déploiement en cas de fort développement des véhicules électriques est également posée, concernant la capacité du réseau électrique à satisfaire la demande tout en respectant les objectifs français sur la production électrique : notamment le plafonnement de la capacité de production nucléaire à 63,2 GW, et la part de 40% des énergies renouvelables dans la production électrique, objectifs d'autant plus difficiles à atteindre que la demande d'électricité (et donc la production qu'elle nécessite) est élevée (MEDDE, 2015b). En effet, bien que cela puisse paraître évident, le véhicule électrique ne permet pas de baisser les consommations énergétiques (mais seulement de le transférer vers d'autres sources), puisque la consommation sur l'ensemble de son cycle de vie est comparable au véhicule thermique (ADEME, 2013b). De même, un développement massif de

la mobilité électrique garderait entière la problématique des externalités négatives de la congestion, de l'occupation au sol et du stationnement, ou de l'accidentologie. Ainsi son développement ne doit pas être une excuse pour ne pas agir sur les autres domaines, comme ont pu le critiquer des ONGs sur les ambitions de la loi de transition énergétique en termes de transport.

Cependant, ces limites ne doivent pas cacher les **potentiels du VE** sur de nombreux critères. Dans un avis publié en 2016, l'ADEME reconnait comme potentiels du VE de participer à la limitation de la dépendance au pétrole importé, à la baisse des émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'à réduire fortement les externalités négatives de bruit et à éviter les émissions de polluants atmosphériques à l'utilisation.

En raison de son coût et de son impact plus fort à la production, la pertinence économique et environnementale du VE est d'autant plus forte que le véhicule est utilisé intensément. Ainsi, sur le plan économique, la pertinence est maximale pour des distances comprises entre 50 et 80 km/jour (Figure 29), c'est-à-dire pour des véhicules plus utilisés que la moyenne française qui était de 12 753 km/an en 2014 (ADEME, 2016a). Sur le plan de l'impact sur le changement climatique, le bilan sera plutôt favorable à partir de 50 000 km cumulés, et favorable quelles que soient les hypothèses sur la variabilité à partir de 80 000 km, soit l'équivalent de plus de 6 ans d'utilisation du véhicule pour une utilisation moyenne.

Enfin, le VE est complémentaire avec d'autres technologies et évolutions actuelles. En effet, il facilite l'utilisation du numérique et le développement du véhicule autonome. De même la complémentarité avec l'autopartage peut être valorisée, afin d'encourager les ménages à remplacer le véhicule thermique par un VE, et profiter de l'autopartage pour louer une voiture thermique pour les quelques usages de la voiture en longue distance. Le VE peut également servir de stockage pour l'électricité, besoin qui devrait se développer de plus en plus avec la pénétration progressive des énergies renouvelables sur le réseau d'électricité (ADEME, 2016b).

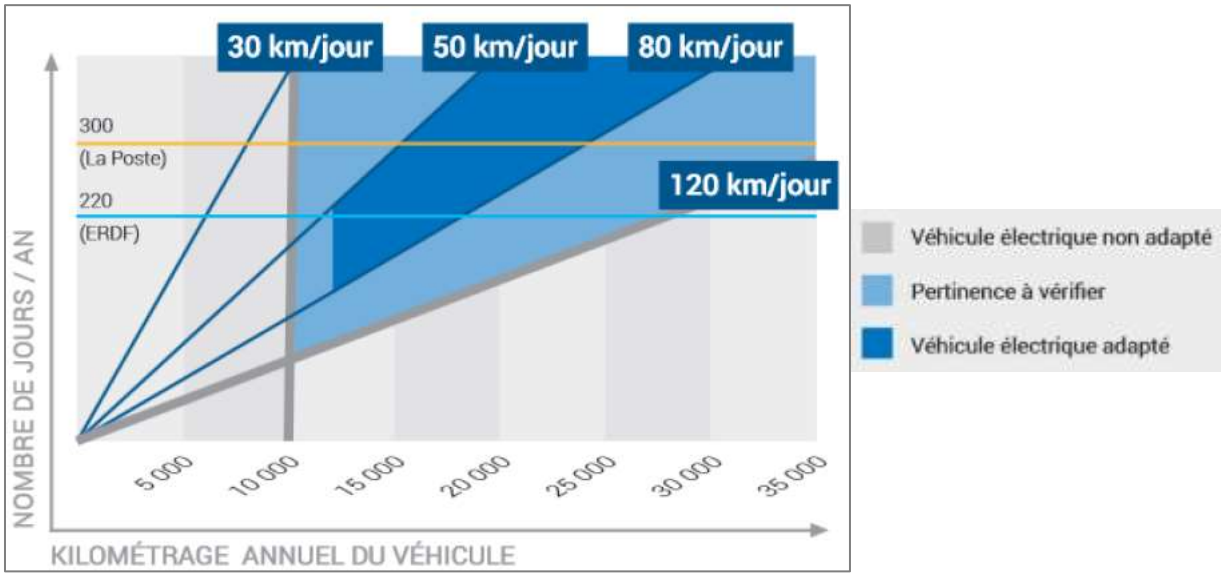


Figure 29 : Pertinence économique du véhicule électrique en fonction de son usage quotidien/annuel (ADEME, 2016b)

Les évolutions sont fortement conditionnées par les **politiques publiques**. Dans le cadre de la LTECV, l'Etat a mis en place des aides à l'achat de véhicules électriques qui peuvent monter jusque 10 000 € (un superbonus de 3700€ qui s'ajoute aux 6300€ correspondant au bonus écologique maximum, ADEME, 2016a) lors de la mise au rebut d'un véhicule diésel de 2001 ou antérieur. Cette mesure peut être contestable dans le cas de l'achat par exemple d'une Tesla modèle S, une voiture de luxe au prix d'achat de 70 800 € minimum dont le poids de 2 300 kg rend son bilan d'émissions sur l'ensemble de son cycle de vie sûrement moins bon qu'une voiture citadine thermique (David, 2012).

Cependant les aides semblent nécessaires dans un premier temps pour développer le marché, les infrastructures de recharge et l'intérêt des consommateurs. Par ailleurs, une analyse au niveau des 5 plus gros marchés européens de VE a montré que les aides à l'achat sont les dispositifs publics les plus efficaces pour favoriser l'essor du VE (ICCT, 2016).

Dans le scénario le plus ambitieux de la PPE, le ministère prévoit que les ventes de VE et des véhicules hybrides rechargeables atteindront respectivement 6,6 et 9,2% des parts de marché en 2030, contre 1,5 et 1,6% en 2015 (MEEM, 2016b). Cette progression se ferait surtout d'ici 2020, et le parc dépasserait les 4,4 millions de VE en 2030 (à comparer au parc de 31,7 millions de VP en 2014 ; ADEME, 2016a).

3.1.5.2. Développement du gaz

Moins connu et moins plébiscité que les véhicules électriques, le gaz n'en est pas moins un carburant **fortement développé dans les scénarios**. Il va jusqu'à représenter des proportions importantes du mix énergétique des transports, puisqu'il fournit 57% de l'énergie des transports pour négaWatt, 49% pour la vision de l'ADEME, 42% pour GrDF, et 26% pour le scénario DIV de l'ANCRE. Les autres scénarios ne le développent pas ou de manière assez marginale (Figure 26). De plus, les scénarios qui développent le gaz naturel véhicule (GNV) prévoient que l'approvisionnement en gaz se fera en grande partie à partir de ressources renouvelables. Le scénario négaWatt prévoit par exemple que 10% du gaz sera d'origine fossile, 40% sera du biogaz, 34% proviendra de biomasse cogénérée, et 16% sera issu de la méthanation (utilisation du surplus d'électricité renouvelable pour générer du gaz de synthèse). De plus, le scénario de l'ADEME prévoit que les efforts importants d'efficacité énergétique dans le bâtiment permettront de « libérer » du gaz pour les transports.

Comme l'indique le scénario de GrDF, c'est une **technologie déjà mâture** pour tous les transports routiers, pour le fluvial et le maritime. Le parc mondial de véhicules au GNV était de 13 millions en 2010, dont quasiment 1 millions pour l'UE27. En France, cette solution n'est pour l'instant que très peu développée, avec un peu plus de 12 000 véhicules routiers seulement (toutes catégories confondues) à la fin de l'année 2015, essentiellement pour des flottes privatives de bus ou de camions.

La **PPE** prévoit un développement modéré du gaz, avec un parc de 249 000 véhicules particuliers en 2030 (soit moins de 1% du parc actuel), et des parts de 4% pour le parc des véhicules utilitaires légers (VUL), 7% pour les PL et 12,5% dans le scénario le plus optimiste pour les bus et autocars (MEEM, 2016b). Par ailleurs, un appel à projets « Solutions intégrées de mobilité GNV » a été lancé par l'ADEME, visant à la fois les stations GNV et les flottes de véhicules, pour amorcer le développement de la filière (Actu-environnement, 2016b).

3.1.5.3. Développement des biocarburants

Les biocarburants ont rencontré un fort succès dans les années 2000, où le développement de la filière a été fortement encouragé par les politiques publiques. Cependant, les **doutes** sur leur coût, leur réelle efficacité environnementale et surtout sur la concurrence de leur usage avec les cultures alimentaires, ont ralenti son développement. Les promoteurs des biocarburants ont donc cherché à développer des filières alternatives aux carburants de 1ère génération (à base de cultures alimentaires), en développant les biocarburants de 2ème génération (à partir de végétaux non alimentaires) et la 3ème génération (à base d'algues).

Globalement, les scénarios ne tablent pas sur une forte croissance des biocarburants, à part dans le scénario Négatep qui prévoit une part de 40%, le scénario DIV de l'ANCRE qui prévoit une part de biocarburants de 37% dans le mix énergétique, tandis que le scénario du CIRED-RAC prévoit qu'ils représenteront 39% des produits pétroliers raffinés en 2050. Ces 3 scénarios prévoient tous un déploiement des technologies de 2ème génération.

La France continue d'encourager le développement des biocarburants, avec un objectif d'incorporation en 2015 de 7% dans l'essence et de 7,7% dans le gazole. Ils représentent la principale piste pour atteindre l'objectif de 10% d'énergies renouvelables dans les transports en 2020 (MEEM, 2016b).

3.1.5.4. Développement de l'hydrogène

Enfin, la technologie hydrogène est très peu citée dans les scénarios, très certainement en raison des **incertitudes** sur son possible développement et notamment les nombreux leviers technologiques et économiques qu'il reste à lever pour voir une généralisation de ce type de motorisation à l'avenir. Tout d'abord, l'hydrogène n'est pas une énergie primaire (que l'on retrouverait dans la nature), mais uniquement un vecteur énergétique que l'on produit à partir de l'électrolyse de l'eau ou vaporeformage de gaz naturel, et sa production est énergivore. Cet hydrogène (ou plus précisément le dihydrogène H_2) est utilisé soit directement dans un moteur à explosion interne utilisant l'hydrogène comme carburant, ou bien dans une pile à combustible qui produit de l'électricité pour alimenter un moteur électrique. La faible densité énergétique volumique de l'hydrogène nécessite de le compresser plusieurs centaines de fois, posant un défi technique pour éviter les fuites ou les risques d'incendie. Enfin, tout comme pour le véhicule électrique, la combustion de l'hydrogène ne rejette pas de polluants atmosphériques, ainsi son développement pourra être avantageux si l'hydrogène est produit avec un faible impact environnemental (Connaissance des énergies, 2016b).

Seulement le scénario d'électrification de l'ANCRE et le scénario de Greenpeace prévoient un développement de l'hydrogène dans les transports, à hauteur respectivement de 16% et de 6% du mix énergétique des transports en 2050.

La **PPE** prévoit d'accompagner le développement de cette technologie, et notamment encourager le développement de « flottes captives » et le développement du stockage des énergies renouvelables par hydrogène décarboné. Cependant elle ne fixe pas de cap précis pour le moment, mais relaye les prévisions de 1 000 véhicules à hydrogène en 2020 du plan Nouvelle France Industrielle, et la prévision de 800 000 véhicules en 2030 par le consortium H2 Mobilité France (MEEM, 2016b).

3.2. Application à un modèle de répartition RER - voiture

3.2.1. Description du modèle

3.2.1.1. Contexte et objectifs du modèle

Le modèle s'applique à une répartition modale entre le RER (noté R dans la suite du document) et la voiture (V) pour un trajet domicile-travail. Les applications numériques sur le chiffrage des émissions de CO_2 sont réalisées sur des ordres de grandeur qui correspondent à un trajet Paris-Palaiseau d'une vingtaine de kilomètres.

La différenciation des usagers se fait selon la distance Θ qui les sépare de la gare de RER, avec Θ Є [0 ; 1]. Les usagers les plus proches de la gare prendront le RER tandis que les plus éloignés (lorsque Θ tend vers 1) choisiront la voiture. Pour l'ensemble des situations présentées par la suite, l'objectif est de déterminer :

- ✓ La répartition modale à l'équilibre ($\tilde{O}^{eq}$, thêta tilde à l'équilibre) lorsque les usagers choisissent leur optimum individuel, sans tenir compte des externalités ;
- ✓ La répartition modale à l'optimum social ($\tilde{O}$*), en tenant compte de la congestion, puis en tenant compte également de l'externalité de pollution de la voiture ;
- ✓ Les valeurs optimales de la subvention et de l'éventuelle taxe, afin que les usagers intègrent le coût des externalités dans leurs choix individuels ;
- ✓ Enfin, dans l'application numérique, un chiffrage des émissions de CO_2 est réalisé, pour évaluer l'impact relatif de différentes mesures de politiques publiques, de changements de comportement et de progrès technologiques.

Dans un premier temps, le modèle est présenté et les principales équations sont résolues. Ensuite, une application numérique est réalisée avec des valeurs simples et non représentatives de la réalité, mais qui sont néanmoins cohérentes avec l'objet de l'étude. A partir de cet exemple, l'impact de la subvention et de la taxe sont évalués, ainsi que l'influence d'autres mesures et évolutions du système de transport. L'objectif de cette évaluation est d'observer l'impact de la modification des paramètres clés du modèle sur la répartition modale, le montant de la fiscalité (subvention et taxe), et sur les émissions de CO_2. Enfin, les apports, les limites et les perspectives d'évolution du modèle sont discutés.

Il faut noter que ce modèle est très simple dans sa formulation et n'est pas calibré avec des données réelles. Son objectif est donc avant tout de formaliser de manière simplifiée des tendances et non de proposer une vision réaliste permettant de tirer des enseignements pour les politiques de transport ou les évolutions à venir.

3.2.1.2. Principales spécifications et équations du modèle

Pour éviter les confusions dans la suite du document, il est important de noter que le $\tilde{O}$ représente donc 2 grandeurs :

- ✓ Comme indiqué plus haut, c'est la distance à la gare de RER pour les usagers, 0 correspondant aux personnes habitant au niveau de la gare, et 1 les personnes les plus éloignées (arbitrairement cela pourrait être 10 km par exemple) ;
- ✓ C'est aussi la proportion de voyageurs qui prennent le RER : si $\tilde{O}$ = 0,2 alors seules les personnes habitant à une distance inférieure ou égale à 0,2 prennent le RER (donc 20%), le reste prend la voiture.

On a donc les quantités de voyageurs suivantes :

Usagers du RER : $\mathbf{q_R} = \tilde{O}$

Usagers de la voiture : $\mathbf{q_V} = 1 - \tilde{O}$

avec $\tilde{O} \in [0 ; 1]$

Ensuite on prend les fonctions de coûts suivantes pour les trajets en RER et en voiture :

$$\mathbf{c_R(q_R)} = a_R + b_R.(q_R^2/2)$$
$$\mathbf{c_V(q_V)} = a_V + b_V.(q_V^2/2)$$

En remplaçant par les $\tilde{O}$, on a :

$$\mathbf{c_R(\tilde{O})} = a_R + b_R.(\tilde{O}^2/2)$$
$$\mathbf{c_V(1\text{-}\tilde{O})} = a_V + b_V.((1\text{-}\tilde{O})^2/2)$$

De plus, le coût total d'un trajet en RER comprend également le coût du trajet jusqu'à la gare, qui est $\gamma.\Theta$, le coût total du RER est donc :

$$a_V + b_V.((1\text{-}\tilde{O})^2/2) + \gamma.\Theta$$

Les coûts marginaux de transport sont les suivants :

$$\mathbf{c_R'(\tilde{O})} = b_R.\tilde{O}$$
$$\mathbf{c_V'(1\text{-}\tilde{O})} = b_V.(1\text{-}\tilde{O}) \text{ ou } \mathbf{c_V'(\tilde{O})} = -b_V.(1\text{-}\tilde{O})$$

3.2.1.3. Equilibre individuel pour les usagers

Les calculs sont détaillés pour cette partie, seulement les expressions générales seront indiquées par la suite.

A l'équilibre, en minimisant les coûts directs pour les usagers, le coût du RER (en comptant le coût du trajet jusqu'à la gare) est égal au coût de la voiture pour le passager situé à une distance $\tilde{O}$ de la gare, on a donc :

$$\mathbf{c_R(\tilde{O}) + \gamma.\tilde{O} - c_V(1\text{-}\tilde{O}) = 0}$$

On développe les expressions de c_R et c_V :

$$a_R + b_R.\frac{\tilde{O}^2}{2} + \gamma.\tilde{O} - a_V - b_V.\frac{(1-\tilde{O})^2}{2} = 0$$
$$\frac{1}{2}.(b_R - b_V).\tilde{O}^2 + (\gamma + b_V).\tilde{O} + (a_R - a_V - \frac{1}{2}.b_V) = 0$$

Cela nous donne une équation du second degré du type $\boldsymbol{a.\tilde{O}^2 + b.\tilde{O} + c = 0}$, avec :

$$a = \frac{1}{2}.(b_R - b_V)$$
$$b = (\gamma + b_V)$$
$$c = a_R - a_V - \frac{1}{2}.b_V$$

Il suffit de calculer :

$$\mathbf{\Delta} = b^2 - 4ac = (\gamma + b_V)^2 - 4.\frac{1}{2}.(b_R - b_V).(a_R - a_V - \frac{1}{2}.b_V)$$
$$\Delta = (\gamma + b_V)^2 - (b_R - b_V).(2a_R - 2a_V - b_V)$$

Dans le cas où $\Delta>0$ (si l'on spécifie bien les fonctions), on a 2 racines, dont l'une d'elles est comprise entre 0 et 1, elle correspond donc à la valeur de $\tilde{O}^{eq}$ recherchée :

$$\mathbf{\tilde{O}^{eq}_{1,2}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\mathbf{\tilde{O}^{eq}_{1,2}} = \frac{-(\gamma + bV) \pm \sqrt{((\gamma + bV)^2 - (bR - bV).(2aR - 2aV - bV))}}{bR - bV}$$

3.2.1.4. Optimum social

A l'optimum social, on prend également en compte le coût des externalités exercées par les voyageurs sur la congestion des modes. On minimise donc la fonction de coût :

$$\mathbf{C} = \int_{\mathbf{0}}^{\tilde{O}} (\mathbf{cR}(\tilde{O}) + \boldsymbol{\gamma}.\Theta)\, \mathbf{d}\Theta + \int_{\tilde{O}}^{\mathbf{1}} \mathbf{cV}(\mathbf{1} - \tilde{O})\, \mathbf{d}\Theta$$

On dérive par rapport à Θ afin de trouver l'optimum Õ* qui correspond à :

$$\frac{\partial c}{\partial \Theta}(\tilde{O}^*) = 0$$

On trouve :

$$[c_V - c_R - \gamma.\tilde{O}] - \tilde{O}.c_R'(\tilde{O}) + (1-\tilde{O}).c_V'(1-\tilde{O}) = 0$$

Ou :

$$\frac{3}{2}.(b_R - b_V).\tilde{O}^2 + (\gamma + 3b_V).\tilde{O} + (a_R - a_V - \frac{3}{2}.b_V) = 0$$

Viennent donc s'ajouter à la formule $c_V - c_R - \gamma.\tilde{O}$ que l'on avait à l'équilibre, l'impact des coûts marginaux du RER et de la voiture (dont le niveau dépend de b_R et b_V). Ils correspondent à l'influence des passagers supplémentaires qui prennent le moyen de transport en question : plus le mode de transport est utilisé, plus les routes ou les rames de RER sont encombrées, et plus le coût du trajet est élevé.

A nouveau l'équation du second degré se résout en calculant Δ et en gardant la racine comprise entre 0 et 1. On a donc la répartition modale optimale socialement, avec la part modale du RER (Õ*) en tenant compte des externalités de congestion :

$$\tilde{\mathbf{O}}^*_{\mathbf{1,2}} = \frac{-(\gamma + 3bV) \pm \sqrt{((\gamma + 3bV)^2 - (3bR - 3bV).(2aR - 2aV - 3bV))}}{3bR - 3bV}$$

L'externalité de congestion non prise en compte par les usagers justifie l'intervention publique, par exemple par une subvention au mode le moins congestionné, qui est supposé être le RER dans ce modèle (on posera ensuite un $b_V > b_R$ pour satisfaire à cette exigence, ces grandeurs représentant la facilité de ces modes à entrainer de la congestion, ou bien l'inverse de la capacité de ces modes).

3.2.1.5. Subvention du RER

L'objectif est ici de trouver la subvention optimale s_R* qui permet d'atteindre l'optimum en situation d'équilibre.

Les 2 équations à l'équilibre et à l'optimum sont pour rappel :

$$c_R + \gamma.\tilde{O} - c_V = 0$$

$$[c_R + \gamma.\tilde{O} - c_V] + \tilde{O}.c_R' - (1-\tilde{O}).c_V' = 0$$

En introduisant une subvention, on modifie l'équation d'équilibre des usagers, on a donc :

$$c_R + \gamma.\tilde{O} - c_V - \mathbf{s_R} = 0$$

En effet le coût du RER pour l'usager est devenu :

$$c_R + \gamma.\Theta - s_R = 0$$

Ainsi pour faire correspondre les 2 équations, on doit prendre une subvention du montant :

$$s_R = -\tilde{O}.c_R' + (1-\tilde{O}).c_V'$$

Ce qui donne, avec Õ* connu :

$$\mathbf{s_R}^* = -(b_R - b_V).\tilde{O}^{*2} - 2.b_V.\tilde{O}^* + b_V$$

3.2.1.6. Introduction d'une externalité de pollution P

Une externalité est désormais ajoutée à la voiture, elle correspond à la pollution générée par ce mode, qui dépend du nombre de personnes qui font le trajet en voiture. L'externalité marginale p_V est constante, on a donc la forme :

$$\mathbf{P_V} = p_V.q_V = p_V.(1-\tilde{O})$$

L'équation d'équilibre reste ici inchangée, car les usagers ne prennent pas en compte cette externalité. Cependant, l'optimum est modifié, puisqu'on ajoute le coût de l'externalité de la voiture :

$$[c_R + \gamma.\tilde{O} - c_V] + \tilde{O}.c_R' - (1-\tilde{O}).c_V' - \mathbf{(1-\tilde{O}).p_V} = 0$$

De même, l'optimum $\tilde{O}^*$ est modifié, la répartition modale optimale résout l'équation :

$$\frac{3}{2}.(b_R - b_V).\tilde{O}^2 + (\gamma + 3b_V + p_V).\tilde{O} + (a_R - a_V - \frac{3}{2}.b_V - p_V) = 0$$

$$\mathbf{\tilde{O}^*_{1,2}} = \frac{-(\gamma + 3bV+pV) \pm \sqrt{((\gamma + 3bV+pV)^2 - (3bR - 3bV).(2aR - 2aV - 3bV - 2pV))}}{3bR - 3bV}$$

Et le montant de la subvention optimale au RER va augmenter, et devient :

$$s_R = - \tilde{O}.c_R' + (1-\tilde{O}).c_V' + \mathbf{(1-\tilde{O}).p_V}$$

Ou :

$$\mathbf{s_R^*} = -(b_R - b_V).\tilde{O}^{*2} + (-2.b_V - \mathbf{p_V}).\tilde{O}^* + b_V + \mathbf{p_V}$$

3.2.1.7. Ajout d'une taxe sur la voiture

A la fois l'externalité de congestion et l'externalité de pollution sont plus fortes pour la voiture que pour le RER, lorsque la proportion d'usagers du RER est faible. La subvention au RER peut donc prendre en compte ces 2 externalités.

Il est également possible d'introduire une taxe sur les trajets en voiture, ou la subvention et la taxe peuvent se cumuler. L'introduction d'une taxe sur la voiture (t_V) modifie le choix des usagers, ils équilibrent désormais les coûts de la manière suivante :

$$c_R + \gamma.\tilde{O} - c_V - s_R - \mathbf{t_V} = 0$$

Le niveau de la fiscalité F ne change pas, et la taxe et la subvention sont substituables, ainsi :

$$\mathbf{F^* = s_R^* + t_V^*} = -(b_R - b_V).\tilde{O}^{*2} + (-2.b_V - p_V).\tilde{O}^* + b_V + p_V$$

3.2.1.8. Politique publique à budget contraint

L'introduction d'une taxe peut surtout permettre de générer des recettes pour le régulateur, et ces recettes peuvent servir à financer les subventions au RER. Il est donc possible de trouver un niveau de taxe et de subvention tel que la somme des recettes de la taxe sur la voiture soit égale à la somme des subventions octroyées au RER :

$$\begin{cases} \tilde{O}^*.s_R^* = (1-\tilde{O}^*).t_V^* \\ s_R^* + t_V^* = F^* \end{cases}$$

avec F* la fiscalité totale qui est connue.

On a les niveaux de subvention et de taxe optimaux pour une politique à budget contraint :

$$\begin{cases} s_R^* = (1-\tilde{O}^*).F^* \\ t_V^* = \tilde{O}^*.F^* \end{cases}$$

3.2.2. Application numérique

Dans l'application numérique suivante, la valeur des paramètres pour les fonctions de coût est indiquée dans le Tableau 5 ci-dessous. Ces valeurs seront amenées à changer pour mesurer l'impact de mesures et d'évolutions dans le domaine des transports. De même, la valeur de l'externalité de pollution sera prise à $p_V = 5$ et sera modifiée dans des variantes de l'application numérique.

Tableau 5 : Valeur des paramètres des fonctions de coût des transports dans l'application numérique

RER			Voiture	
a_R	b_R	γ	a_V	b_V
2	4	2	1	8
c_R		$\gamma\tilde{O}$	c_V	
$2 + 4\tilde{O}^2/2$		$2\tilde{O}$	$1 + 8(1-\tilde{O})^2/2$	
Coût total RER			**Coût total voiture**	
$2\tilde{O}^2 + 2\tilde{O} + 2$			$1 + 4(1-\tilde{O})^2$	

On a donc les formes suivantes :

$$\mathbf{c_R(\tilde{O})} = 1 + 4.\ (\tilde{O}^2/2) = 2\tilde{O}^2 + 1$$

$$\boldsymbol{\gamma.\tilde{O}} = 2.\tilde{O}$$

$$\mathbf{c_V(\tilde{O})} = 1 + 8.((1-\tilde{O})^2/2) = 4\tilde{O}^2 - 8\tilde{O} + 5$$

Les dérivées sont :

$$\mathbf{c_R'(\tilde{O})} = 4.\tilde{O}$$

$$\mathbf{c_V'(1-\tilde{O})} = 8.(1-\tilde{O})$$

On remarque ainsi que le coût marginal est plus fort pour la voiture ($b_V > b_R$), ainsi elle sera plus impactée par les problèmes de congestion que le RER. Cependant la voiture présente un coût inférieur pour le premier usager ($a_V < a_R$). Lorsque la proportion de voyageurs en RER augmente, c'est également le coût pour rejoindre la gare qui augmente de manière linéaire.

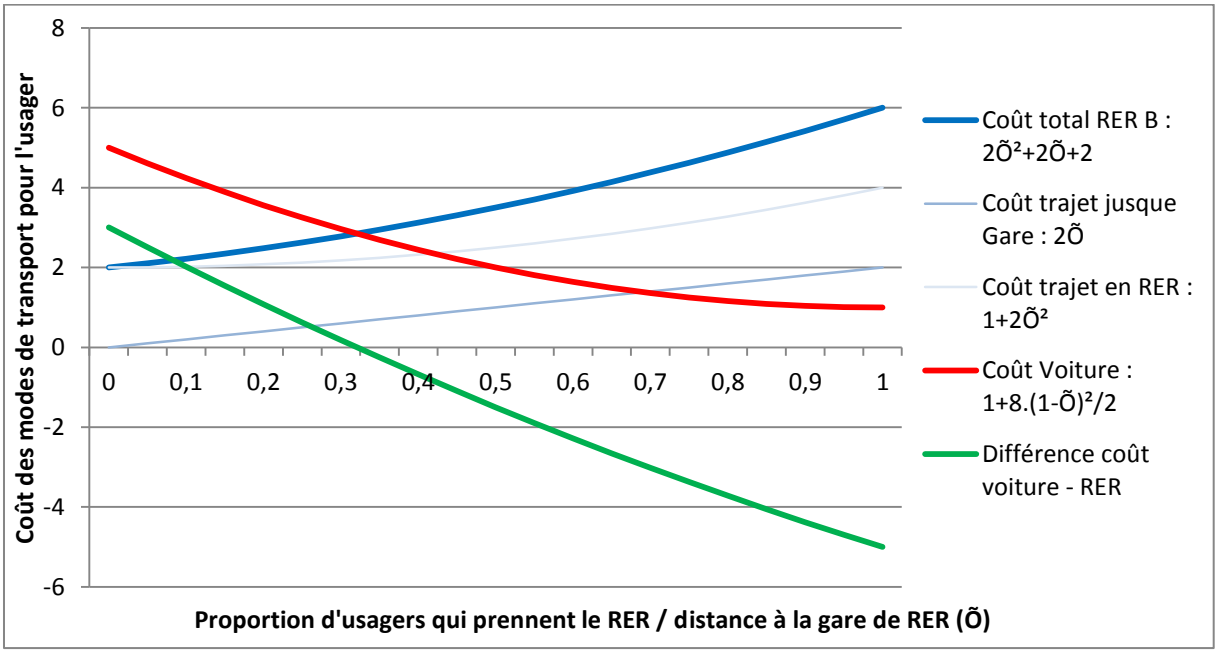


Figure 30 : Coût du RER et de la voiture pour les usagers selon la proportion d'usagers qui prennent le RER

3.2.2.1. Equilibre pour les usagers

A l'équilibre, en minimisant les coûts, on a :

$$c_R(\tilde{O}) + \gamma.\tilde{O} - c_V(1-\tilde{O}) = 0$$

$$\frac{1}{2}.(b_R - b_V).\tilde{O}^2 + (\gamma + b_V).\tilde{O} + (a_R - a_V - \frac{1}{2}.b_V) = 0$$

$$-2.\tilde{O}^2 + 10.\tilde{O} - 3 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4ac = 100-24 = 76$$

$$\tilde{O}_1 = 4{,}68 \; ; \; \tilde{O}_2 = 0{,}32$$

Etant donné que l'on cherche des valeurs comprises entre 0 et 1, on garde :

$$\mathbf{\tilde{O}^{eq} = 0{,}32}$$

Cela signifie que 32% de la population prend le RER, tous ceux qui sont à une distance inférieure ou égale à 0,32 de la gare. C'est la proportion de voyageurs qui annule la différence de coût entre les 2 modes, pour les voyageurs situés à une distance de 0,32 de la gare, et lorsque ces usagers ne prennent pas en compte l'externalité de congestion qu'ils exercent sur le mode choisi.

Ainsi la lecture graphique de la Figure 30 ci-dessus montre que la différence entre le coût de la voiture et du RER (courbe verte) est nulle pour un $\tilde{O}$ un peu supérieur à 0,3, ce qui correspond à l'équilibre $\tilde{O}^{eq} = 0{,}32$ trouvé par le calcul.

3.2.2.2. Optimum social avec congestion

A l'optimum social, on prend également en compte le coût des externalités exercées par les voyageurs sur la congestion des modes :

$$[c_V - c_R - \gamma.\tilde{O}] - \tilde{O}.c_R' + (1-\tilde{O}).c_V' = 0$$

$$\frac{3}{2}.(b_R - b_V).\tilde{O}^2 + (\gamma + 3b_V).\tilde{O} + (a_R - a_V - \frac{3}{2}.b_V) = 0$$

$$-6\tilde{O}^2 + 26\tilde{O} - 11 = 0$$

On trouve les racines $\tilde{O}_1 = 3{,}86$ et $\tilde{O}_2 = 0{,}48$, on retient donc :

$$\mathbf{\tilde{O}^* = 0{,}48}$$

A l'optimum, c'est donc 48% de la population qui prend le RER, en raison des coûts de congestion plus faibles pour ce mode lorsque la proportion de voyageurs en RER est inférieure à environ 60% (voir Figure 31). Cette externalité, non prise en compte par les usagers à l'équilibre, fait que leur choix individuel les incite à moins prendre le RER que dans la situation qui est socialement optimale. Une solution pour atteindre cet optimum est donc de subventionner le RER pour encourager les usagers à utiliser davantage ce mode.

3.2.2.3. Subvention du RER

La subvention s_R^* qui permet d'influencer les usagers dans leur choix de manière à atteindre l'optimum social est donné par l'expression suivante :

$$s_R^* = -(b_R - b_V).\tilde{O}^{*2} - 2.b_V.\tilde{O}^* + b_V$$

$$s_R^* = 4.(\tilde{O}^*)^2 - 16\,\tilde{O}^* + 8$$

$$\mathbf{s_R^* = 1{,}30}$$

Le RER doit donc être subventionné à hauteur de $s_R^* = 1{,}30$ pour prendre en compte l'externalité de congestion.

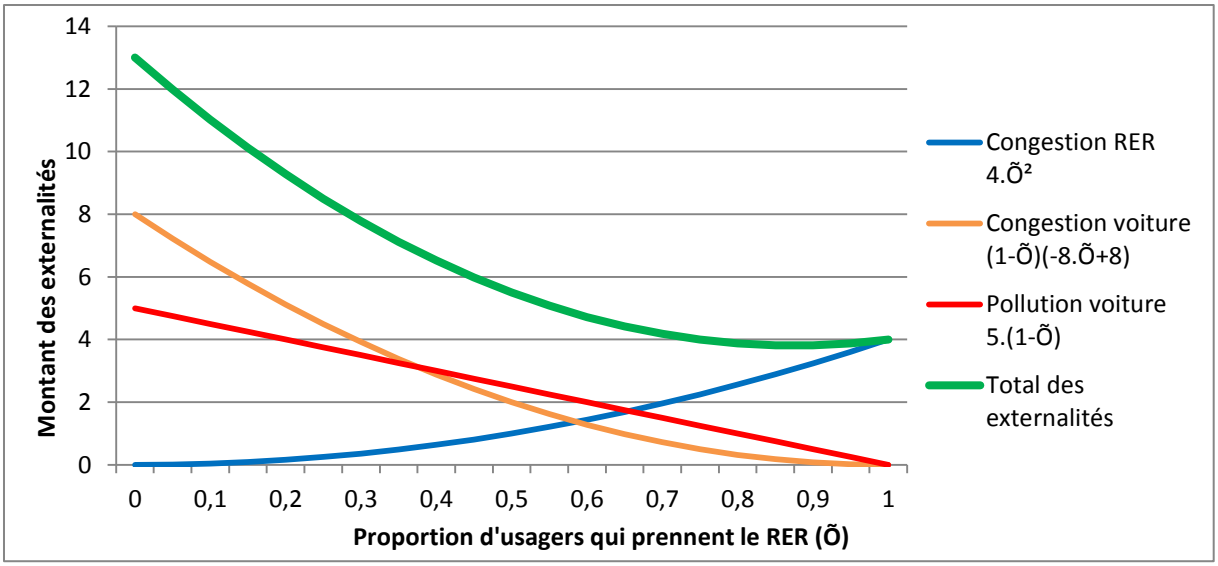


Figure 31 : Montant des externalités du RER, de la voiture, et les externalités totales, en fonction de la proportion d'usagers qui prend le RER

Lecture de la figure : lorsque la proportion d'usagers du RER est faible (par exemple Õ =0,2), l'externalité de congestion du RER est faible tandis que l'externalité de congestion (et de pollution quand elle est ajoutée) de la voiture est forte.

3.2.2.4. Introduction d'une externalité de pollution P

Une externalité de pollution $P_V = p_V.(1-Õ)$ est désormais ajoutée à la voiture, et $p_V = 5$. Cela change l'optimum social, et donc la valeur de la répartition modale optimale Õ* :

$$[c_R + \gamma.Õ - c_V] + Õ.c_R' - (1-Õ).c_V' - (1-Õ).p_V = 0$$

$$\frac{3}{2}.(b_R - b_V).Õ^2 + (\gamma + 3b_V + p_V).Õ + (a_R - a_V - \frac{3}{2}.b_V - p_V) = 0$$

$$-6Õ^2 + 31Õ - 16 = 0$$

On trouve les racines $Õ_1 = 0,58$ et $Õ_2 = 4,59$, on retient donc la seconde valeur :

$$\mathbf{Õ^* = 0,58}$$

L'ajout d'une nouvelle externalité négative sur la voiture favorise d'avantage le RER puisque 10% d'usagers en plus prennent ce moyen de transport par rapport à la situation où seule l'externalité de congestion était prise en compte. Ainsi, la subvention au RER devra augmenter pour atteindre l'optimum social :

$$s_R^* = -(b_R - b_V).Õ^{*2} + (-2.b_V - \mathbf{p_V}).Õ^* + b_V + \mathbf{p_V}$$

$$s_R^* = 4.(Õ^*)^2 - 21.Õ^* + 13$$

$$\mathbf{s_R^* = 2,14}$$

3.2.2.5. Ajout d'une taxe sur la voiture, et budget contraint

Il a été vu que la subvention au RER et la taxe sur la voiture produisent le même effet tant que leur montant total reste contant $s_R^*+t_V^* = F^*$. A budget contraint, la taxe permet cependant de générer des revenus pour financer les subventions, avec : $Õ^*.s_R^* = (1-Õ^*).t_V^*$. Dans notre exemple, avec F* = 2,14, on a :

$$\mathbf{s_R^*} = (1-Õ^*).F^* = \mathbf{0,90}$$

$$\mathbf{t_V^*} = Õ^*.F^* = \mathbf{1,24}$$

3.2.3. Evolutions supplémentaires dans les transports

3.2.3.1. Hypothèses sur le chiffrage des émissions de CO_2

Différentes évolutions dans le système de transport sont testées dans la suite de ce chapitre. L'objectif est d'évaluer leur impact notamment sur les émissions de CO_2 des trajets, en retenant les hypothèses de départ suivantes (dont certaines seront modifiées ensuite) :

- ✓ Estimation grossière de 5 000 voyageurs qui font l'aller-retour Paris-Palaiseau chaque jour (la ligne B accueillait 870 000 voyageurs par jour en 2013 (SNCF, 2014), mais les trajets possibles sur la ligne sont très nombreux), ce qui donne 10 000 trajets par jour ;
- ✓ Emissions d'environ 100 gCO_2 pour un trajet Paris-Palaiseau en RER B et 2500 g en voiture (respectivement 103 et 2562 depuis Luxembourg ; Transilien, 2016). Les trajets pour rejoindre la gare ne sont pas comptés dans les émissions, de manière à simplifier les calculs. Les chiffres seront donnés en tCO_2 pour une meilleure lisibilité ;
- ✓ On suppose en moyenne 200 allers-retours à Palaiseau par an (l'équivalent de 40 semaines de 5 jours, les autres jours travaillés étant sans déplacement à Palaiseau).

Le chiffrage des émissions annuelles est donc :

$$\mathbf{gCO_2} = \tilde{O} \times 10\,000 \text{ trajets} \times 200 \text{ jours} \times 100g + (1-\tilde{O}) \times 10\,000 \times 200 \text{ j} \times 2\,500g$$

Cela donne en tCO_2 :

$$\mathbf{tCO_2 = 2 \times [\tilde{O} \times 100 + (1-\tilde{O}) \times 2\,500]}$$

Si tout le monde prend le RER ($\tilde{O}$=1), on a des émissions de 200 tCO_2 (l'équivalent des émissions annuelles de 20 français).

Si tout le monde prend la voiture ($\tilde{O}$=0), on a des émissions de 5 000 tCO_2 (l'équivalent des émissions de 500 français, soit 10% des usagers qui font Paris-Palaiseau).

En plus des valeurs absolues des émissions, des pourcentages d'évolution des émissions sont donnés, toujours par rapport à la situation d'équilibre des usagers sans prise en compte des externalités ($\tilde{O}$ = 0,32), situation pour laquelle les émissions sont de 3 461 tCO_2.

3.2.3.2. Les mesures et évolutions testées

Les bases du modèle et de sa résolution numérique ont été posées dans les 2 premières parties. En modifiant les valeurs des paramètres des coûts de transport et de l'externalité de pollution, il est désormais facile de trouver (lorsque les solutions existent) : les nouvelles répartitions modales à l'équilibre individuel des usagers, et les répartitions à l'optimum social en prenant en compte l'externalité de congestion et éventuellement la pollution des voitures ; le niveau des subventions et taxes pour atteindre cet optimum social ; chiffrer les émissions de CO_2 liées à cette nouvelle situation.

Trois types de leviers dans les transports ont été identifiés dans la comparaison des scénarios de transition énergétique, il s'agit des changements dans les politiques publiques, de changements de comportements et de changements technologiques.

De même, **5 domaines d'action** ont été identifiés : la modération des déplacements, le report modal, le covoiturage et l'autopartage, l'efficacité énergétique des véhicules et enfin le choix des carburants.

L'objectif est ici d'évaluer les impacts de quelques-unes de ces évolutions dans divers domaines d'action :

- ✓ L'impact des politiques publiques a été illustré par la mise en place de subvention au RER et de taxe sur la voiture (mesures influençant le choix modal). L'impact cumulé de ces outils de politique publique avec les évolutions ajoutées sera aussi évalué ;
- ✓ Des changements de comportements seront intégrés, avec l'impact du télétravail, d'un report modal vers le vélo pour les trajets jusque la gare, et l'impact du covoiturage ;
- ✓ Enfin, des changements de technologie sont testés, avec une évolution reflétant une combinaison de progrès d'efficacité énergétique et de changement de carburant.

L'ensemble des résultats sur les répartitions modales, la fiscalité et les émissions de CO_2 de ces 6 évolutions (subvention, taxe sur le CO_2, télétravail, vélo, covoiturage, et technologie) sont résumées dans le Tableau 6 page suivante. Le choix des paramètres pour les 6 évolutions et leur impact sur les résultats sont détaillés ci-dessous.

3.2.3.2.1. Modification de la fiscalité (subvention au RER et taxe CO_2)

La prise en compte des externalités dans le modèle et l'introduction d'une fiscalité favorable au RER a été détaillée précédemment. Leur impact sur les émissions de CO_2 est élevé, puisque la seule introduction d'une subvention au RER pour prendre en compte la congestion permet de réduire les émissions de 21%, et l'introduction de l'externalité de pollution et de la taxe sur le CO_2 (avec $p_V = 5$) permettent une diminution de 36% par rapport à la situation de référence. Ces réductions sont atteintes grâce au report modal vers le RER.

3.2.3.2.2. Influence d'une politique de télétravail

Il est supposé que 1 jour sur 10 devient télétravaillé. Cela peut correspondre par exemple à un jour de télétravail par semaine pour la moitié des emplois. L'influence sur les émissions de CO_2 correspond tout d'abord à une baisse de 10% du nombre de trajets, qui passent de 2 millions de trajets annuels à 1,8 million.

L'autre changement est que cette baisse du nombre de trajets, en supposant qu'elle est régulièrement répartie au cours de la semaine, permet de diminuer la congestion. La quantité de voyageurs diminuant de 10%, elle passe de 1 à 0,9. Les personnes prenant le RER passent de $\tilde{O}$ à $0{,}9.\tilde{O}$ et celles prenant la voiture de $(1-\tilde{O})$ à $0{,}9.(1-\tilde{O})$. Etant donné que la quantité de voyageurs est au carré dans la fonction de coût, on a par exemple pour le coût du RER :

$$c_R(\tilde{O}) = a_R + b_R.(0{,}9.\tilde{O})^2/2$$
$$= a_R + 0{,}9^2.b_R.\tilde{O}^2/2$$

On peut donc multiplier par $0{,}9^2$ les paramètres b_R et b_V. Le modèle se réécrit donc avec $b_R = 6{,}48$ et $b_V = 3{,}24$.

L'impact sur les émissions de CO_2 est donc double, avec 2 effets opposés : la diminution du nombre de trajets de 10% réduit d'autant les émissions ; mais dans le même temps, la diminution de la congestion est à l'avantage de la voiture, dont la part modale augmente au détriment du RER, augmentant ainsi les émissions.

Le premier effet l'emporte malgré tout, et la politique de télétravail permet de diminuer les émissions de 5% à l'équilibre des usagers, et de -36% à -42% en ajoutant les externalités. Le niveau de la fiscalité ne change pas sensiblement.

Tableau 6 : Impact des 6 évolutions testées sur les parts modales, les émissions de CO_2 et la fiscalité (les paramètres en gris sont les paramètres modifiés d'une évolution à l'autre)

	Initial	Subvention RER	Taxe CO_2	Télétravail	Vélo	Covoiturage	Technologie	6 mesures
a_V	1	1	1	1	1	0,75	1	0,75
b_V	8	8	8	6,48	8	6	8	4,86
a_R	2	2	2	2	2	2	2	2
b_R	4	4	4	3,24	4	4	4	3,24
γ	2	2	2	2	1	2	2	1
Externalité CO_2 voiture **(p_V)**	0	0	5	5	5	3,75	3	2,25
Emissions voiture **(gCO_2/voy)**	2500	2500	2500	2500	2500	1875	1500	1125
Equilibre pour les usagers sans prise en compte de la congestion ni de la pollution								
Part modale RER **($\tilde{O}^{eq}$)**	**32%**	**32%**	**32%**	**28%**	**36%**	**23%**	**32%**	**21%**
Emissions CO_2 **(tCO_2)**	3461	3461	3461	3295	3260	2951	2102	1825
Variations CO_2 **(Δ%)**	0%	0%	0%	-5%	-6%	-15%	-39%	-47%
Optimum social avec subvention au RER pour prendre en compte la congestion (s_R)								
Part modale RER **($\tilde{O}$*)**	**-**	**48%**	**48%**	**46%**	**50%**	**41%**	**48%**	**41%**
Emissions CO_2 **(tCO_2)**	-	2719	2719	2542	2600	2284	1669	1400
Variations CO_2 **(Δ%)**	-	-21%	-21%	-27%	-25%	-34%	-52%	-60%
Subvention au RER **(s_R*)**	-	1,30	1,30	1,27	1,00	1,38	1,30	1,11
Optimum social en ajoutant l'externalité du CO_2 des voitures (p_V) + Taxe sur cette externalité (t_V)								
Part modale RER **($\tilde{O}$*)**	**-**	**-**	**58%**	**58%**	**61%**	**52%**	**54%**	**50%**
Emissions CO_2 **(tCO_2)**	-	-	2208	1990	2086	1911	1477	1227
Variations CO_2 **(Δ%)**	-	-	-36%	-42%	-40%	-45%	-57%	-65%
Subv. RER + Taxe Voit **(s_R*+t_V*)**	-	-	2,14	2,14	1,73	2,13	1,85	1,54
Montant de s_R* et t_V* avec budget contraint : recettes taxes = somme des subventions								
Subvention au RER **(s_R*)**	-	-	0,90	0,90	0,68	1,02	0,84	0,77
Taxe CO_2 voiture **(t_V*)**	-	-	1,24	1,24	1,05	1,10	1,01	0,77

3.2.3.2.3. Le report vers le vélo pour rejoindre la gare RER

La deuxième évolution que l'on peut ranger plutôt du côté du changement de comportement concerne le report modal pour les trajets jusqu'à la gare de RER. Il est supposé que la moitié des usagers du RER prennent désormais le vélo pour se rendre à la gare, ainsi ils ne supportent aucun coût de transport lié à ce déplacement. Ce coût passe en moyenne de 2Õ à Õ (le coût unitaire γ passe de 2 à 1) pour les usagers du RER.

Cette baisse du coût du RER entraîne un report vers ce mode et une baisse relativement modérée des émissions. La part modale du RER passe par exemple de 32% à 36% pour l'équilibre pour les usagers, tandis que les émissions de CO_2 baissent de 6%. Dans le même temps, le besoin de fiscalité baisse sensiblement, et passe de 2,14 à 1,73 (-19%) pour atteindre l'optimum social en prenant en compte les externalités de congestion et de pollution.

Cependant, l'impact pourrait être encore plus fort si l'hypothèse était prise que les trajets pour rejoindre la gare étaient initialement réalisés en voiture, et que leurs émissions associées étaient comptabilisées. Cela nécessiterait cependant de taxer également ces trajets en voiture jusqu'à la gare, et éventuellement de leur ajouter une externalité de congestion.

3.2.3.2.4. L'impact du covoiturage

Une autre évolution des comportements concerne le développement du covoiturage. Il est supposé que le taux de remplissage augmente d'un tiers, et donc que les émissions par personne transportée en voiture diminuent de 25%. Le coût moyen du trajet en voiture diminue donc aussi de 25% (av=0,75 et b_V=6), tout comme l'externalité environnementale marginale (p_V passe de 5 à 3,75) et les émissions par voyageur (2500 à 1875 gCO_2/voy).

Les deux effets opposés constatés pour la politique de télétravail se retrouvent pour le le covoiturage. Les fortes baisses d'émissions des trajets en voiture (-25%) sont en partie compensées par du report modal vers la voiture qui coûte désormais moins cher aux usagers et dont la congestion est moins forte. Pour l'équilibre des usagers, les émissions de CO_2 diminuent ainsi de 15% grâce au covoiturage, alors que la part modale du RER a chuté de 32 à 23%. L'introduction du covoiturage montre un impact relativement faible sur la fiscalité.

3.2.3.2.5. Les évolutions technologiques

Enfin, une évolution technologique est testée. Une forte progression de l'efficacité énergétique et/ou une diffusion de technologies bas-carbone permettent de diminuer de 40% les émissions de CO_2 par trajet, qui passent de 2 500 à 1 500 gCO_2/voy, tandis que l'externalité marginale de la pollution passe de 5 à 3. Cela pourrait correspondre notamment à un remplacement de 40% du parc par des véhicules à faibles émissions (électrique, biogaz…) de 500 gCO_2/voy, tandis que 40% du parc serait remplacé par des véhicules hybrides ou plus efficaces énergétiquement avec des émissions de 2 000 gCO_2/voy. On aurait en moyenne :

$$gCO_2^{moy} = 20\% \times 2500 + 40\% \times 2000 + 40\% \times 500 = 1500\ gCO_2/voy$$

En raison des hypothèses optimistes sur la technologie, les résultats sur les émissions sont importants, et le changement n'impacte les parts modales et le niveau de la fiscalité que dans le cas où l'externalité environnementale et la taxe carbone sont introduites (autrement p_V n'intervient pas encore dans les équations). Dans ce dernier cas, la part modale du RER diminue de 58% à 54% et le niveau total de la fiscalité baisse également de 2,14 à 1,85. Les réductions d'émissions passent de -36% (sans progrès technologiques) à -57%.

3.2.3.2.6. La combinaison des 6 évolutions

Enfin, le dernier test consiste à combiner toutes les mesures. Cela nécessite de légères modifications pour certains paramètres (en gris foncé dans le tableau), lorsqu'ils sont concernés par plusieurs évolutions.

Ainsi le paramètre b_V a été modifié à la fois par la politique de télétravail et le covoiturage, qui permettent notamment de diminuer la congestion sur les routes. La combinaison de la multiplication par $0{,}9^2$ pour le télétravail et la diminution de 25% pour le covoiturage donnent la nouvelle valeur de $b_V = 8 \times 0{,}9^2 = 0{,}75 = 4{,}86$.

De même, les émissions de CO_2 par voyageur sont concernées par la baisse de 25% liée au covoiturage combiné à la baisse de 40% liée aux progrès technologiques. Les émissions d'un trajet en voiture baissent donc de 55% (émissions de 1 125 gCO_2/voy), tout comme le montant de l'externalité marginale liée aux voyageurs en voiture (p_V passe à 2,25).

Sans surprise, la combinaison de ces 6 mesures permet d'avoir les plus fortes réductions des émissions de CO_2, avec une baisse de 65% (un facteur 3). La combinaison des mesures hors fiscalité (donc télétravail, vélo, covoiturage et technologie) permet quasiment d'atteindre un facteur 2, avec une baisse de 47%.

De même, la fiscalité est plus faible que dans les autres situations étudiées. Mais elle reste malgré tout supérieure aux subventions nécessaires lorsque seule l'externalité de congestion est introduite (donc sans externalité de pollution).

Enfin, la combinaison des évolutions hors fiscalité est à l'avantage d'un report modal vers la voiture, puisque seul le report modal vers le vélo est à l'avantage du RER parmi les évolutions testées en plus de la subvention et de la taxe. Ainsi, sans fiscalité, la part modale du RER est de 32% dans le cas initial, et de 21% en combinant le télétravail, le vélo, le covoiturage et la technologie. De même, avec fiscalité sur la congestion et la pollution, la part du RER passe de 58% avec la fiscalité seule, à 50% en combinant les 6 évolutions.

3.2.4. Discussion et perspectives du modèle

3.2.4.1. Apports du modèle et des résultats

En conclusion, le modèle de répartition, aussi simple soit-il dans sa formulation, permet de mettre en évidence des effets cohérents de différentes politiques publiques, changements dans les comportements ou dans la technologie utilisée. Des doubles effets opposés ont pu être identifiés, notamment pour le télétravail et le covoiturage où la baisse du nombre de voitures sur les routes implique en fait un report modal vers ce mode, réduisant ainsi le potentiel de réduction des émissions de CO_2.

L'analyse des résultats selon les 3 critères de répartition modale, des émissions de CO_2 et de fiscalité permet également de différencier les tendances selon leurs impacts sur différentes composantes du système de transport. Cela peut permettre de pondérer ces résultats selon les objectifs prioritaires de la politique de transport. Ainsi, avec les hypothèses retenues, le vélo présente un impact essentiellement sur la fiscalité, la technologie agit surtout sur les émissions de CO_2, tandis que la fiscalité présente de forts potentiels de report modal.

Enfin, la combinaison des évolutions entre elles donne des informations sur la possible complémentarité ou substituabilité de ces changements pour atteindre les objectifs fixés.

3.2.4.2. Limites et perspectives d'étude

Les possibilités de ce modèle simple et de la modification de ses paramètres dans le but d'évaluer des évolutions possibles (dans les politiques publiques, les comportements ou la technologie), ne doivent pas masquer ses fortes limites. Elles constituent autant de pistes d'améliorations possibles du modèle :

- ✓ Le modèle n'est pas calibré pour refléter la réalité des coûts, les paramètres ont seulement été choisis pour répondre à une certaine cohérence. De la même manière que l'évaluation des émissions s'est basée sur des données se rapprochant de la réalité, il serait possible d'incorporer des fonctions de coût représentant une valeur monétaire ;
- ✓ Le critère de choix se base uniquement sur la fonction de coût, qui reflète en réalité plusieurs facteurs sans les expliquer ou les différencier : un coût monétaire (notamment pour la fiscalité), le coût du temps (pour la congestion de la voiture), l'effet du confort (pour la congestion du RER où les passagers s'entassent), etc. Calibrer les fonctions de coût nécessiterait de clarifier ces composantes et leurs impacts sur le coût des modes de transport ;
- ✓ La fonction de coût pour rejoindre la gare peut également être précisée. Le mode devrait aussi être indiqué, impliquant de revoir sa forme (fonction linéaire, affine, quadratique…?) et les externalités qui lui sont associées (congestion, facteur d'émission de CO_2 notamment) ;

Ainsi la priorité serait de travailler sur les fonctions de coût, leur spécification et leur réalisme. Dans des perspectives bien plus large, rendre utilisable ce modèle pour un exercice de prospective ou l'évaluation de politiques publiques, demanderait dans la mesure du possible de :

- ✓ Introduire d'autres différenciations entre les usagers que leur distance à la gare ;
- ✓ Ajouter d'autres modes de transport et essayer de retrouver les parts modales observées sur le trajet ;
- ✓ Etendre la réflexion à un périmètre plus large ou à du trajet longue distance ;
- ✓ Pour un raisonnement sur du long terme, imaginer des possibilités de déménagement d'une partie des usagers ;
- ✓ Ou encore fixer un horizon temporel à ces évolutions et les rapprocher de scénarios de transition énergétique dans les transports.

4. Discussion et perspectives

4.1. Conclusions sur la comparaison des scénarios

La **comparaison des 27 scénarios de prospectives à 2050** (et 2 scénarios à 2035) provenant de 13 publications permet de dresser un panorama des évolutions possibles pour atteindre la contribution du secteur des transports au facteur 4 : l'objectif fixé par la stratégie nationale bas-carbone de diminuer d'au moins 70% des émissions de CO_2 entre 2013 et 2050.

La méthodologie utilisée a consisté à confronter les hypothèses, mesures et résultats des différents scénarios. Les précautions à prendre pour la comparaison directe des chiffres ont été précisées, étant donné les différences de périmètres sectoriel, temporel, voire géographique entre les scénarios.

La **typologie des scénarios** réalisée différencie les scénarios selon qu'ils sont tendanciels ou volontaristes sur la transition énergétique dans les transports, puis selon que les principaux paramètres et hypothèses du modèle sont endogènes ou exogènes aux transports. Quatre catégories apparaissent donc, avec 4 scénarios tendanciels dits exogènes, 4 scénarios tendanciels endogènes, 2 scénarios volontaristes exogènes, et enfin 17 scénarios volontaristes endogènes. Cette dernière catégorie constitue la plus intéressante dans le cadre de cette étude.

Ainsi ces 17 scénarios ont été différenciés selon le type de leviers privilégiés pour obtenir les baisses d'émissions, à savoir les évolutions des **politiques publiques**, de la **technologie** et des **comportements** de mobilité.

Il apparait que tous les scénarios tendanciels, qui reposent essentiellement sur les évolutions techniques, ne permettent au mieux que l'atteinte d'un facteur 2, avec des hypothèses optimistes.

Sur les 19 scénarios volontaristes, environ la moitié des scénarios permettent d'**atteindre la contribution au facteur 4** : en effet, les 3 scénarios de négaWatt, l'ADEME et Greenpeace permettent de dépasser largement le facteur 4 avec des baisses des émissions d'environ 93% ; 6 autres scénarios permettent d'atteindre une baisse de 70% ; 2 autres l'atteignent seulement sous certaines variantes du scénario ; et 8 scénarios ne l'atteignent pas (parmi lesquels 3 scénarios ne concernent que le transport longue distance).

Par ailleurs, les scénarios mettent en évidence la plus difficile décarbonation du transport de marchandises comparé au transport de voyageurs.

L'analyse ne montre pas de fortes différences de résultats suivant que les scénarios s'appuient plutôt sur le levier politique, technologique, ou comportemental. C'est surtout la combinaison de ces leviers et des types d'actions engagées qui permet d'obtenir des résultats en accord avec l'objectif de facteur 4.

Les mesures et évolutions permettant d'atteindre le facteur 4 ont été classées en cinq catégories, sur lesquelles des points de convergence et de divergence apparaissent entre les scénarios :

6) **Limitation de la demande de transport** : alors que les scénarios s'accordent en général sur le développement du télétravail, l'importance donnée à la réorganisation du territoire est variable tandis que peu de scénarios tablent sur une relocalisation des

activités économiques et des modes de vie. En conséquence, l'évolution de la demande de transport est très variable selon les scénarios, avec des croissances en général plus élevées pour le transport de marchandises ;

7) **Choix modal** : les scénarios volontaristes s'accordent sur l'importance de réduire la place du mode routier, bien qu'il reste majoritaire dans l'ensemble des scénarios. Ainsi, la part de la voiture baisse au profit des transports en commun et des modes actifs (marche et vélo) pour le transport de voyageurs. De même, une partie du trafic routier de marchandises est transféré vers les modes ferroviaires et fluviaux. Ces modifications demandent de forts investissements en infrastructures, des évolutions de la fiscalité en faveur des modes les moins polluants (taxe carbone, redevance poids-lourds, etc.), et des incitations aux comportements vertueux des usagers. Par ailleurs, la place de l'avion est controversée, et nécessite des actions des pouvoirs publics notamment sur la fiscalité, afin d'éviter une forte croissance du trafic à l'avenir ;
8) **Partage et taux de remplissage des véhicules** : les scénarios s'accordent sur le besoin de poursuivre le développement actuel du covoiturage. L'autopartage, les véhicules serviciels ou les minibus sont également fortement développés dans les scénarios les plus volontaristes. Des progrès sur les taux de remplissage du transport de marchandises sont également prévus, parfois encouragés par une redevance poids-lourds ;
9) **Efficacité énergétique** : les progrès techniques sur les moteurs se poursuivent dans l'ensemble des scénarios, avec l'aide du développement des véhicules hybrides dans une majorité d'entre eux. Mais les gains d'efficacité énergétique proviennent aussi plus rarement d'usages plus sobres des véhicules, en particulier via le développement des petits véhicules urbains, la baisse de la vitesse sur les routes ou l'écoconduite ;
10) **Choix des carburants** : c'est assurément le point le plus divergent des scénarios. Les paris sur les technologies déployées sont en effet très variables selon les scénarios, avec parfois un transfert important vers les motorisations au gaz (ADEME, négaWatt, GrDF) ou les véhicules électriques (Greenpeace, Négatep, ANCRE ELE). De même, les carburants liquides et gazeux connaissent une pénétration plus ou moins importante des carburants d'origine renouvelable que sont les biocarburants et le biogaz. Enfin, seulement deux scénarios tablent sur le développement de l'hydrogène (Greenpeace et ANCRE ELE).

Même si ces scénarios et l'analyse se focalisent sur les émissions de CO_2, il est important de noter que la majorité des mesures et évolutions préconisées vont également dans le sens d'une réduction des **autres externalités des transports**.

En effet, les scénarios volontaristes tendent vers des transports plus économes en ressources, moins polluants, permettant de réduire le bruit, la congestion, l'accidentologie tout comme l'occupation au sol. De même, le développement des modes actifs présente des avantages certains pour la santé, ce qui constitue l'externalité positive la plus importante.

Bien que l'impact de tels scénarios sur le développement des territoires ou les inégalités ne soit pas évalué, les scénarios qui possèdent une analyse économique pointent les bénéfices de la transition énergétique pour l'activité économique, l'emploi ou encore la balance commerciale.

4.2. Discussion sur les hypothèses des modèles

Les hypothèses des scénarios jouent un rôle central dans les scénarios, et pourtant elles sont généralement peu détaillées ou expliquées, ce qui complique généralement leur comparaison ainsi que leur lecture critique. Ces faiblesses sont ici pointées, en notant dans la mesure du possible les publications qui répondent le mieux à ces problématiques, et les préconisations ou pistes de recherche qui en découlent.

4.2.1. Hypothèses exogènes et hypothèses endogènes

Les hypothèses endogènes aux transports ont été longuement discutées dans le cœur de la présente étude, ce qui n'est pas le cas des **hypothèses exogènes**, malgré leur importance dans une grande majorité des scénarios.

Les hypothèses de croissance démographique sont en général très proches d'un scénario à l'autre, puisqu'elles correspondent aux prévisions de l'INSEE. Seule différence majeure, les prévisions des études les plus anciennes (PREDIT et CGPC) prévoyaient une population en 2050 plus faible que les études les plus récentes.

Au contraire, les hypothèses de croissance économique sont assez variables d'un scénario à l'autre, bien que la majorité des scénarios prévoient des taux de croissance du PIB entre 1,5 et 2,0%/an. Pourtant, la tendance des dernières décennies est à la baisse du taux de croissance, bien avant la crise économique de 2007-2008 (Figure 32) : il est progressivement passé de 5,9% en moyenne dans les années 60 à 1,1% pour les six premières années de la décennie 2010. La plupart des scénarios prévoient en fait un retour à des taux de croissance que la France a connu dans les années 1990 et 2000. Si cette baisse est en partie liée à des causes structurelles comme l'approvisionnement de plus en plus difficile en énergie abondante et peu chère (tel que discuté dans le chapitre 1, voir 1.2.2) qui ne devrait pas s'améliorer dans les décennies à venir, ces taux de croissance pourraient être surestimés.

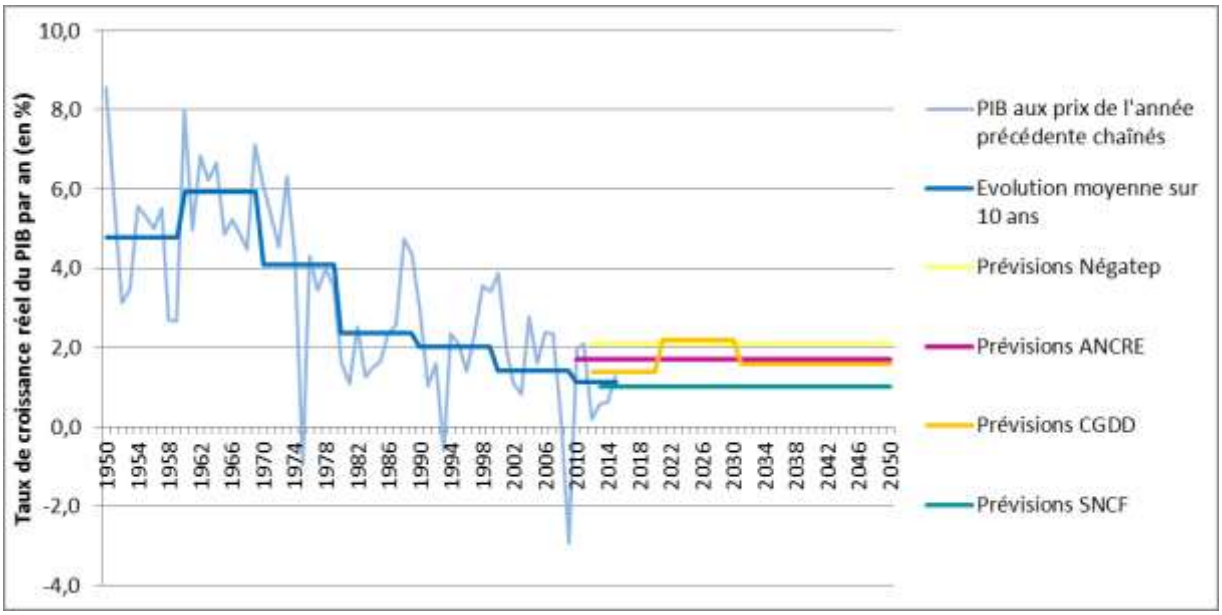


Figure 32 : Taux de croissance réels de la France entre 1950 et 2015 (INSEE, 2016b) et prévisions de croissance d'ici 2050 de 4 scénarios étudiés

Les scénarios de la SNCF font exception avec un taux de croissance prudent à 1%, plus en ligne avec les taux de la décennie en cours. Une autre piste est d'effectuer des analyses de sensibilité avec des taux de croissance supérieurs ou inférieurs à la valeur moyenne utilisée, afin d'évaluer l'influence de ce paramètre sur les résultats.

Les prévisions concernant les prix du pétrole sont en général tirées des scénarios de l'AIE. Pourtant, le passé a montré que ses prévisions même à quelques années se révélaient fausses avec le recul (Manicore, 2012). De plus, il est fort probable que la hausse régulière des prix qu'elle prévoit d'ici 2050 ne se réalisera pas. En effet, avec une contrainte énergétique croissante, il est certes probable que les prix soient plus élevés, mais surtout de plus en plus volatils (Manicore, 2012), comme cela a déjà pu être constaté dans la dernière décennie. Les cycles de prix hauts puis bas auraient des répercussions fortes sur la dynamique économique qui serait elle aussi de plus en plus volatile : lorsque les prix sont bas, cela dope la croissance ; la demande de pétrole augmente, faisant ainsi remonter les prix et les investissements en exploration & production, jusqu'à ce que l'économie entre en récession lorsque les prix sont trop hauts ; la demande ralentit alors, faisant à nouveau chuter les prix, comme cela se passe depuis l'été 2014 ; un nouveau cycle pourrait alors recommencer, l'économie française profitant du pétrole bas (voir Figure 10 dans la partie 1.2.2.3).

Les prix du pétrole étant de plus en plus imprévisibles, la solution pour la modélisation ne passe pas par de meilleures prévisions, mais à nouveau par des analyses de sensibilité des résultats à ce paramètre. L'idéal serait même de tester la sensibilité à des prix du pétrole et à des taux de croissance volatils, malgré la difficulté que l'on peut imaginer d'un point de vue technique. Ce type de volatilité doit cependant être de plus en plus pris en compte, car il a notamment des implications pour la fiscalité de l'énergie, puisque les taxes forfaitaires (type taxe carbone ou TICPE) permettent d'amortir les chocs sur le prix de l'énergie.

En dehors de ces hypothèses exogènes au domaine des transports, d'autres hypothèses ont une **endogénéité** qui porte à débat.

L'étude de Carbone 4 pour le DNTE classe ainsi les demandes de transport de passagers et de marchandises comme des paramètres exogènes, tandis que les autres évolutions des transports sont classées comme étant des mesures (Carbone 4, 2014). Pourtant, il a été vu que des mesures politiques ou des changements de comportement permettaient d'influencer directement la demande de transport, que ce soit par l'aménagement du territoire, les modes de vie et de consommation, ou encore le développement du télétravail.

De même, il n'est pas clair dans la grande majorité des scénarios si les parts modales obtenues en 2050 correspondent à des hypothèses réalisées par les modélisateurs, ou si elles correspondent à des résultats qui découlent d'hypothèses sous-jacentes sur l'évolution de l'offre et des coûts de chaque mode de transport, ou encore des préférences des usagers. Les hypothèses peuvent ainsi se retrouver mélangées aux mesures. Il en va de même dans une moindre mesure pour d'autres paramètres tels que la part relative des différentes énergies dans la mobilité ou l'efficacité énergétique.

Cela rejoint en fait la problématique des détails apportés quant à la définition des paramètres et de leur évolution, point abordé dans la prochaine sous-partie.

4.2.2. Des hypothèses à expliquer

La plupart des publications étudiées possèdent une explication des principales hypothèses, mais le listing des principaux paramètres est parfois incomplet ou non chiffré. Les détails sont parfois importants comme pour les scénarios de l'ADEME et surtout de négaWatt, où une publication annexe détaille les hypothèses et les résultats du scénario.

Plus généralement, le **mode de construction des hypothèses** n'est pas expliqué, et il n'est donc pas possible de savoir pourquoi une valeur a été retenue plutôt qu'une autre. La majorité des scénarios font très sûrement des hypothèses « à dire d'experts », mais cela n'est pas précisé. Une étude qui sort du lot est celle du scénario bas-carbone acceptable réalisé par le CIRED et le RAC, où la méthodologie de construction des mesures politiques acceptables par au moins la moitié des parties prenantes est détaillée. Ce travail est bien plus exigeant, mais cela donne un crédit bien plus fort sur l'acceptabilité du scénario, abordée plus loin.

De plus, **certaines hypothèses sont difficilement comparables** entre elles selon les publications et les unités ou le mode de présentation qu'elles utilisent. C'est le cas notamment des évolutions concernant le taux de remplissage des voitures et le covoiturage (voir 3.1.3.1), où les données initiales sont très différentes d'une étude à l'autre. Le problème venant en partie du manque de fiabilité des données disponibles, la priorité pour corriger ces différences serait donc un travail sur les statistiques de taux de remplissage des voitures.

La comparaison est également difficile pour l'efficacité énergétique des moteurs (voir 3.1.4.1) où les paramètres observés et les unités ne sont pas uniformes : il peut être question de réductions de consommation unitaire (en %), dans d'autres cas de consommations énergétiques (en L de pétrole ou kWh/km) ou d'émissions de CO_2 moyennes (gCO_2/km). De même, les résultats sont rarement détaillés pour les autres modes de transport que la voiture.

Par ailleurs, cette même difficulté dans la comparaison s'illustre aussi avec les résultats des scénarios, en ce qui concerne notamment les différences d'unités ou de valeurs pour l'année de référence pour les parts modales ou les consommations énergétiques.

Enfin, même en connaissant les hypothèses, il est souvent difficile de savoir quel est **l'impact marginal de chaque mesure** sur les résultats, et ainsi quelles sont les mesures structurantes et indispensables pour atteindre le facteur 4. La publication du PREDIT fait ici office de référence, puisqu'une figure fait le bilan de la contribution de chaque mesure aux réductions des émissions (voir Figure 56 en annexe).

Cela pose également la question de l'**intégration au modèle** des hypothèses. En effet, selon les équations dans lesquelles ces hypothèses sont intégrées, leur impact sur les résultats ne sera pas forcément le même. Comme le soulignaient en 2011 les auteurs du scénario du CIRED-RAC à propos des scénarios de transition énergétique : « D'un point de vue méthodologique, les modèles d'ingénieur utilisés apparaissent comme des boites noires, avec leurs propres hypothèses technologiques et qui rendent les résultats peu appropriables par le non-spécialiste » (Développement durable et territoires, 2011). Au mieux, la logique des modèles est expliquée, mais leur fonctionnement n'est que rarement détaillé, de même que leurs principales équations. Cela peut cependant se justifier par une difficulté trop importante à fournir un tel niveau de détail, et le caractère privé des données et des modèles utilisés.

4.2.3. Le réalisme et l'acceptabilité des mesures peu discutés

Etant donné le manque de détails sur de nombreuses hypothèses et sur leur construction, **le réalisme de ces hypothèses** est de fait peu discuté. De même, moins les hypothèses sont détaillées et plus il sera difficile de mettre en doute leur réalisme.

Par exemple, une pénétration de l'électricité à hauteur de 20% du mix énergétique des transports sera difficile à évaluer sans connaitre le parc de véhicules correspondant, le mix électrique, ou si cette électricité est utilisée pour les voitures ou les transports en commun.

La mise en œuvre concrète de la transition énergétique dépendra pourtant du soutien et de l'appropriation par l'ensemble des parties prenantes des évolutions préconisées dans les scénarios. Il apparait donc indispensable de **renforcer le lien entre micro et macro**, c'est-à-dire entre les aspirations des individus et des autres parties prenantes d'un côté, et les modèles macroéconomiques d'un autre côté. Cela afin de vérifier la cohérence globale des scénarios, leur réalisme, et leur caractère acceptable voire souhaitable par la population.

Car certaines évolutions de ces scénarios ne sont pas forcément plébiscitées par la population, et donc pas simples à mettre en place et à faire accepter : taxe carbone, réduction de l'usage de la voiture, limitation des déplacements, changement des habitudes de mobilité, etc. Au contraire, la promotion de la transition énergétique peut s'appuyer sur de solides arguments qui vont dans le sens de l'amélioration de la qualité de vie, et qui gagneraient à être mis en avant : bénéfices santé des modes actifs, villes plus agréables, création d'emplois, etc.

Une option est donc d'étudier l'**acceptabilité des politiques publiques ou des changements de comportements** évoqués. C'est ce qu'a fait le scénario du CIRED et du RAC qui présente des éléments solides sur l'acceptabilité des politiques publiques. L'acceptabilité des changements de comportement s'illustre dans les scénarios de la SNCF, qui a réalisé une enquête sur les aspirations des français en termes de mobilité. Il en ressort trois scénarios contrastés sur des aspirations différentes pour l'avenir de la mobilité. Etant donné la répartition de ces aspirations parmi la population, un ou plusieurs scénarios intermédiaires mêlant ces évolutions pourraient aussi être imaginés.

L'autre piste est d'**améliorer l'implication de toutes les parties prenantes dans la co-construction des scénarios**, comme le notent les auteurs du scénario du CIRED-RAC : « L'enjeu est d'accompagner les travaux de modélisation par des échanges au sein d'une plateforme entre modélisateurs, économistes, technologues, sociologues et représentants de la société civile. Pour renforcer leur légitimité, ces scénarios doivent ainsi participer à l'appropriation sociale et politique des résultats scientifiques. » (Développement durable et territoires, 2011). L'IDDRI plaidait également en 2013 pour la co-construction de la transition énergétique, et rappelait l'importance de la comparaison des scénarios existants : « Plus que les résultats, c'est le processus de co-construction ou de co-analyse des scénarios par les citoyens et par les experts qui importe dans le débat national sur la transition énergétique. Le travail de comparaison des scénarios existants est à ce titre particulièrement pertinent, puisqu'il permet d'identifier les implications techniques et économiques de différents choix politiques et d'élaborer de nouveaux outils d'évaluation, en développant notamment des normes de transparence et une grille d'analyse commune qui permettra à l'avenir d'évaluer plus facilement l'orientation et la richesse des nouveaux scénarios produits. » (IDDRI, 2013).

4.3. Préconisations pour les études prospectives

La partie précédente a mis en avant des points d'améliorations et des pistes de recherche possibles pour les scénarios de transition énergétique, en particulier dans les transports. Tous les scénarios sont construits avec des objectifs et des logiques différentes, et toutes ces préconisations ne sont bien sûr pas forcément adaptées à tous les types de scénarios, et ne sont pas toutes cumulables. Elles sont résumées ici afin de fournir des idées et des pistes de réflexion pour la construction future de scénarios :

- ✓ Favoriser la **co-construction des scénarios** avec les parties prenantes concernées par le périmètre retenu, afin de bénéficier de nombreuses expertises, de mesurer l'acceptabilité des mesures et contribuer à l'appropriation des scénarios par les parties prenantes. Cette construction peut notamment s'appuyer sur le travail réalisé par le CIRED et le RAC pour le scénario bas-carbone acceptable ;
- ✓ L'étude peut également s'appuyer dans la mesure du possible sur des enquêtes portant sur l'**évolution des comportements** de mobilité et sur les aspirations des voyageurs pour leur mobilité et leurs modes de vie (voir scénarios de la SNCF) ;
- ✓ Une **diffusion publique et détaillée** des hypothèses, des résultats, et du fonctionnement du modèle utilisé ne peut également qu'améliorer la compréhension et l'appropriation du scénario (voir notamment les annexes de l'ADEME et négaWatt). Afin de faciliter la comparaison de ces hypothèses et résultats avec d'autres scénarios, il est également conseillé d'utiliser des données et des unités de mesure largement répandues dans la littérature et dans les scénarios existants ;
- ✓ Une **analyse comparée de l'impact des mesures sur les résultats** obtenus permet également de faciliter grandement la compréhension du modèle, et l'importance relative des différentes hypothèses (voir l'analyse de sensibilité des scénarios du PREDIT). Plus largement, des **analyses de sensibilité** sur les paramètres utilisés sont conseillées, aussi bien pour les paramètres endogènes aux transports que pour les paramètres exogènes (voir scénarios du PREDIT et du CIRED-RAC) ;
- ✓ Dans le cas d'une combinaison de diverses mesures difficilement acceptables, un **taux de réussite** peut également être appliqué, comme cela a été fait par Négatep ;
- ✓ Différents scénarios font une **analyse économique** plus ou moins poussée des scénarios. Malgré la difficulté à prévoir les impacts macroéconomiques de la transition énergétique, il est intéressant à minima de proposer une évaluation des investissements nécessaires en infrastructures ou des ordres de grandeur des politiques fiscales concernant les transports (voir ADEME, DGEC, CIRED-RAC, Négatep) ;
- ✓ Il est intéressant également de chiffrer les **impacts sur les externalités** des transports, comme l'a fait la SNCF qui a évalué les impacts de ses scénarios sur les externalités négatives (CO_2, accidentologie, congestion, pollution locales) et positives (santé) ;
- ✓ Enfin, la **décomposition de l'évolution des émissions** selon les critères de demande de transport, taux de remplissage, efficacité énergétique et contenu carbone de l'énergie apporte des éléments intéressants (le CIRED-RAC l'a fait pour l'ensemble des émissions). Elle constitue également une piste d'approfondissement pour la comparaison des scénarios de transition énergétique dans les transports.

Références bibliographiques

4D, 2008. *Le défi du facteur 4 dans les transports. Des scénarios qui interrogent*.

Actu-environnement, 2016a. *Véhicule électrique : le marché dépasse les 20.000 unités en 2015* [en ligne]. Publié le 29/03/2016. Consulté le 29/07/2016. Disponible sur : http://www.actu-environnement.com/ae/news/vehicule-electrique-20000-unites-vente-2015-zoe-tesla-leaf-26501.php4

Actu-environnement, 2016b. *Gaz naturel pour véhicules : lancement d'un appel à projets* [en ligne]. Publié le 22/07/2016. Consulté le 01/08/2016. Disponible sur : http://www.actu-environnement.com/ae/news/gaz-naturel-vehicules-appel-projets-ademe-27268.php4

ADEME, 2012. *Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050*. Synthèse.

ADEME, 2013a. *Evaluation macroéconomique des visions énergétiques 2030-2050 de l'ADEME*. Document technique. Disponible sur : http://www.ademe.fr/evaluation-macroeconomique-visions-energetiques-2030-2050-lademe-l

ADEME, 2013b. *Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques , VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020*. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Gingko21 et PE INTERNATIONAL. Disponible sur : http://www.ademe.fr/elaboration-selon-principes-acv-bilans-energetiques-emissions-gaz-a-effet-serre-autres-impacts-environnementaux

ADEME, 2013c. *L'exercice de prospective de l'ADEME « Vision 2030-2050 »*. Document technique. Disponible sur : http://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050

ADEME, 2015a. *Chiffres clés climat air et énergie*, Edition 2014. Disponible sur : http://www.ademe.fr/chiffres-cles-climat-air-energie-2014

ADEME, 2015b. *Enquête nationale sur l'autopartage entre particuliers*. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : 6t-bureau de recherche. Disponible sur : http://www.ademe.fr/enquete-nationale-lautopartage-entre-particuliers-ena4

ADEME, 2016a. *Chiffres clés climat air et énergie*, Edition 2015. Disponible sur : http://www.ademe.fr/climat-air-energie-edition-2015

ADEME, 2016b. *Les potentiels du véhicule électrique*. Les avis de l'ADEME. Avril 2016. Disponible sur : http://www.ademe.fr/potentiels-vehicule-electrique

ADEME et **CNB**, 2016. *Coût social des pollutions sonores. Analyse bibliographiques des travaux français et européens*. Disponible sur : http://www.bruit.fr/cout-social-du-bruit-en-france-57-milliards-deuros.html

Airparif, 2016a. *Les différents polluants et leur évolution*. Consulté le 02/09/2016. Disponible le : http://www.airparif.asso.fr/pollution/differents-polluants

Airparif, 2016b. *Air et climat, des sources de pollution communes*. Consulté le 02/09/2016. Disponible le : http://www.airparif.asso.fr/pollution/air-et-climat

Alternatives économiques, 2016. *La voiture, reine du rural et du périurbain*. Publié par Vincent Grimault le 26/05/2016. Consulté le 02/09/2016. Disponible sur : http://www.altercoplus.fr/transport/la-voiture-reine-du-rural-et-du-periurbain-201605261600-00003527.html

ANCRE, 2013. *Scénarios énergétiques de l'ANCRE*. Disponible sur : http://www.allianceenergie.fr/presentation-des-scenarios-energetiques-de-l-ancre.aspx

ANCRE, 2014. *Scénarios pour la transition énergétique*. Rapport 2013. Disponible sur : http://www.allianceenergie.fr/page000100dc.asp?card=985

Assemblée nationale, 2015. *Projet de loi de finances rectificatives pour 2015*. N° 3217 [en ligne]. Disponible sur : http://www.assemblee-nationale.fr/14/projets/pl3217.asp

Auzanneau, M., 2015. *Or noir, la grande histoire du pétrole*. Editions La Découverte.

Avenir Sans Pétrole, 2014. *Il reste 1000 ans de pétrole !* [en ligne] Rédigé par Benoît Thévard, 3 Décembre 2014. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : http://www.avenir-sans-petrole.org/2014/12/il-reste-1000-ans-de-petrole.html

BP, 2016a. *Energy in 2015 : A Year of plenty*. London, 8 June 2016. Available at: http://www.bp.com/en/global/corporate/press/speeches/energy-in-2015-a-year-of-plenty.html

BP, 2016b. *BP Statistical Review of World Energy*. June 2016. Available at: http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

Brisbois, X., 2010. *Le processus de décision dans le choix modal : importance des déterminants individuels, symboliques et cognitifs*. Thèse de doctorat en psychologie sociale. Université Pierre Mendès-France - Grenoble II, 2010. Français. Disponible sur : <tel-00556569>

Carbone 4. 2014. *Etude des 4 trajectoires du Débat National sur la Transition Energétique*. Disponible sur : http://www.carbone4.com/fr/l_actu_de_carbone_4/etude-des-4-trajectoires-du-débat-national-sur-la-transition-energétique

Carbone 4, 2016. *Le télétravail, tout le monde y gagne !* [en ligne] Consulté le 26/07/2016. Disponible sur : http://www.carbone4.com/fr/l_actu_de_carbone_4/le-télétravail-tout-le-monde-y-gagne

CAS, 2008. *La valeur tutélaire du carbone*. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet. Disponible sur : http://www.ladocumentationfrancaise.fr/rapports-publics/094000195/

CAS, 2012. *Les nouvelles mobilités dans les territoires périurbains et ruraux*. Rapport de la mission présidée par Olivier Paul-Dubois-Taine. Disponible sur : http://archives.strategie.gouv.fr/cas/content/rapport-les-nouvelles-mobilites-dans-les-territoires-periurbains-et-ruraux.html

CE Delft, 2015. *Tax exemptions and reductions for domestic commercial air passenger transport in France. Foregone tax revenues and impacts of an abolishment*. Available at: http://www.rac-f.org/Salon-du-Bourget-Le-transport

CEC, 2015. *Energie nette et EROI (Energy Return On Investment). Une approche biophysique de la transition énergétique*. Informations & débats n°40. Octobre 2015. Victor Court. Disponible sur : http://www.chaireeconomieduclimat.org/publications/info-debats/

Cerema. *Le covoiturage : des pistes pour favoriser son développement*. Présentation de Christophe Saroli.

Certu, 2012. *La mobilité urbaine en France. Une décennie d'évolutions marquantes*. Séminaire BELdam, 20 septembre 2012. Disponible sur : http://mobilit.belgium.be/sites/default/files/downloads/mobilite_urbaine_france.pdf

CGDD, 2010. *La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. Collection La Revue du CGDD. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-mobilite-des-Francais-panorama.html

CGDD, 2013a. *Les comptes des transports en 2011. Tome 2 : Dossiers d'analyse économique des politiques publiques des transports*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-comptes-des-transports.html

CGDD, 2013b. *Mémoire de la prospective - Tome 1. Vingt travaux majeurs de la première décennie 2000*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Memoire-de-la-prospective-Tome-1.html

CGDD, 2015. *Les comptes des transports en 2014*. Tome 1, 52e rapport à la Commission des comptes des transports de la Nation. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-comptes-des-transports.html

CGDD, 2016a. *Opinions et pratiques environnementales des Français en 2015*. Chiffres & statistiques n°750. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Opinions-et-pratiques.html

CGDD, 2016b. *Chiffres clés du transport*. Collection Repères. Disponible sur : http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2548/874/chiffres-cles-transport-edition-2016.html

CGDD, 2016c. *La demande de transport sur le long terme*. Séminaire MA, 12 février 2016. Document en construction.

CGDD, 2016d. *Le concept d'autoroute électrique pour le transport de marchandises*. Séminaire MA, 31 mars 2016. Ludovic Fragnol.

CGDD, 2016e. *Evaluation de la politique de développement de l'usage du vélo pour les transports du quotidien*. Collection Le point sur. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Evaluation-de-la-politique-de.html

CGDD, 2016f. *Projections de la demande de transport sur le long terme*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Projections-de-la-demande-de.html

CGPC, 2006. *Démarche prospective transports 2050*. Eléments de réflexion.

CGPC, 2006 *Une prospective 2050 pour les transports*.28 juin 2006.

Chaire Energie et Prospérité, 2016. *Economie de l'Energie et Stagnation Séculaire*. Programme. 1ère Conférence Internationale, Paris, 26 et 27 Avril 2016. Disponible sur : http://chair-energy-prosperity.org/activite.html

CIRED et **RAC**, 2010. *Scénarios de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour la France*. Projet EnCiLowCarb. Disponible sur : http://www2.centre-cired.fr/Publications/rapports-et-expertises/article/Scenarios-de-reduction-d-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-pour-la-France

CIRED et **RAC**, 2012. *Un scénario bas carbone "acceptable" pour la France: Elaboration participative et analyse macroéconomique*. Bibas, R., Mathy, S., Fink, M. Disponible sur : <halshs-00797980>

Connaissance des énergies, 2016a. *Pic pétrolier*. Fiche pédagogique [en ligne]. Dernière modification le 20 mai 2016. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/pic-petrolier

Connaissance des énergies, 2016b. *Hydrogène dans les transports*. Fiche pédagogique [en ligne]. Dernière modification le 15/03/2016. Consulté le 01/08/2016. Disponible sur : http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-dans-les-transports

David, D., 2012. *Transports terrestres*. Principales conclusions résultant d'un modèle de calcul. Conférence Débat, The Shift project, 19 juin 2012. Disponible sur : http://www.theshiftproject.org/sites/default/files/files/conf_tsp_ve_david_cea_0.pdf

Développement durable & territoires, 2011. *Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ?* Vol. 2, n° 1, Mars 2011 : Facteur 4. Sandrine Mathy, Meike Fink et Ruben Bibas. Disponible sur : https://developpementdurable.revues.org/8802#tocto3n1

DGAC, 2016. *Calculateur d'émissions de CO_2 de l'aviation*. [en ligne] Consulté le 27/07/2016. Disponible sur : http://eco-calculateur.aviation-civile.gouv.fr/aviation_et_co2_les_chiffres_clefs.html

DGEC, 2014. *Introduction à l'analyse prospective de la DGEC pour préparer la politique énergétique française*. Séminaire RAC.

DGEC, 2015. *Scénarios prospectifs Energie-Climat-Air pour la France à l'horizon 2035*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/scenarios-a-l-horizon-2020-2030.html

Discover, 2011. *Why calorie counts are wrong: cooked food provides a lot more energy* [online]. Published by Richard Wrangham, on December 8, 2011. Consulted on 01/09/2016. Available at: http://blogs.discovermagazine.com/crux/2011/12/08/why-calorie-counts-are-wrong-cooked-food-provides-a-lot-more-energy/#.V8lXGlIwmrN

DNTE, 2013. *Socle de connaissances*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/dnte-socle-de-connaissances.pdf

ECF, 2016. *Cycling facts and figures*. [en ligne] Consulted on 27/07/2016. Available at: https://ecf.com/resources/cycling-facts-and-figures

EEA, 2010. *Images of low carbon transport in 2050 : an end-users perspective*.

European Commission, 2016. *Towards Low-Emission Mobility. Driving the Modernisation of the EU Economy*. EPSC Strategic Notes. Issue 17. 20 July 2016. Available at: http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-2497_en.htm

Forum Vies Mobiles, 2016. *Modes de vie et mobilité, une approche par les aspirations*. Enquête réalisée avec L'ObSoCo. Présentation à la SNCF le 26/06/2016. Disponible sur : http://owncloud.forumviesmobiles.org/index.php/s/FiEGe13cajrv2ZJ

France Stratégie, 2015. *La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques*. Disponible sur : http://www.strategie.gouv.fr/publications/transition-energetique-vue-modeles-macroeconomiques

FUB, 2013. *Vélo : des clefs pour réussir la transition*. Disponible sur : http://www.fubicy.org/index.php/IMg/spip.php?article322

FUB, 2016. *Les villes qui aiment le vélo en France et à l'étranger*. [en ligne] Consulté le 27/07/2016. Disponible sur : http://www.fub.fr/velo-ville/villes-qui-aiment-velo/villes-qui-aiment-velo-france-etranger

Geoffron P. et **Monjon**, S., 2012. *Les scénarios énergétiques pour la France en 2050*. Les Cahiers Français, n°366.

Giraud, G. et **Kahraman**, Z., 2015. *How Dependent is Growth from Primary Energy ? The Dependency ratio of Energy in 33 Countries (1970-2011)*. Disponible sur : https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-01151590/

GrDF, 2013a. *Scénario facteur 4 GrDF. Synthèse et description des hypothèses*.

GrDF, 2013b. *Objectif Facteur 4. Le rôle du réseau de gaz dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre à horizon 2050*.

Greenpeace, 2013. *Scénario Transition Energétique*. Disponible sur : http://www.greenpeace.fr/energie/enjeux/ajax/scenario/scenario-transition.html

Héran, F., 2014 *Le retour de la bicyclette. Une histoire des déplacements urbains en Europe de 1817 à 2050*. La Découverte.

Heredote.net. *Néolithique : Sédentarisation et agriculture* [en ligne]. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : https://www.herodote.net/Neolithique-synthese-165.php

ICCT, 2016. *Comparison of leading electric vehicles policy and deployment in Europe*. Available at: http://www.theicct.org/comparison-ev-policies-europe-2016

IDDRI, 2013. *Scénarios de transition énergétique pour la France : définir un espace de discussion pour le débat*. Elie Bellevrat, Andreas Rüdinger, Michel Colombier, Emmanuel Guérin. Disponible sur : http://www.iddri.org/Publications/Scenarios-de-transition-energetique-pour-la-France-definir-un-espace-de-discussion-pour-le-debat

IEA, 2015. *Key World Energy Statistics*. Available at: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2015.html

INSEE, 2016a. *Bilan démographique 2015*. [en ligne] Consulté le 22/07/2016. Disponible sur : http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=0&ref_id=bilan-demo

INSEE, 2016b. *Produit Intérieur Brut (PIB) et grands agrégats économiques*. [en ligne] Consulté le 22/07/2016. Disponible sur : http://www.insee.fr/fr/themes/theme.asp?theme=16&sous_theme=1

INSEE, 2016c. *Émissions de CO_2 liées aux déplacements : les longs trajets, en voiture, pénalisent l'Aquitaine*. Consulté le 29/07/2016. Disponible sur : http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=4&ref_id=20485&page=edossier/edos_13_02/edos_1302_comp.htm

IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

IPCC, 2014a. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/

IPCC, 2014b. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for policymakers*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at : https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

IPCC, 2014c. *Transport*, Chapter 8. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/

ITF, 2012. *Peak Travel, Peak Car and the Future of Mobility. Evidence, Unresolved Issues, Policy Implications, and a Research Agenda*. Phil Goodwin. Available at: http://www.oecd-ilibrary.org/fr/transport/peak-travel-peak-car-and-the-future-of-mobility_5k4c1s3l876d-en

ITF, 2016. *Shared Mobility: Innovation for Liveable Cities*. Synthèse. Disponible sur : http://www.itf-oecd.org/node/20210

Kempf, H., 2013 *Fin de l'Occident, naissance du monde*. Editions Seuil.

L'Argus, 2015. *Voiture moyenne 2014 : son prix a encore augmenté !* [en ligne] Publié le 26 mars 2015. Disponible sur : http://www.largus.fr/actualite-automobile/voiture-moyenne-2014-son-prix-a-encore-augmente-6057387.html

La Fabrique Ecologique, 2016. *Les territoires ruraux et périurbains, terres d'innovation pour la mobilité durable. Un enjeu majeur, des initiatives indispensables*. Disponible sur : http://www.lafabriqueecologique.fr/#!blank-7/wc0jw

LeMonde, 2014. *La voiture électrique n'est pas « écologique »* [en ligne]. Publié le 26/06/2014. Disponible sur : http://www.lemonde.fr/planete/article/2014/06/26/publicite-la-voiture-electrique-n-est-pas-ecologique_4445251_3244.html

Les Verts - ALE, 2012. *L'Europe face au pic pétrolier*. Benoît Thévard. Disponible sur : http://peakoil-europaction.eu/l27etude.html

LET & Enerdata, 2008. *Phase 2 du programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en terme d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution trans-frontières*. PREDIT 3, GO n° 11 Politique des transports. Disponible sur : http://www.predit.prd.fr/predit3/synthesePublication.fo?inCde=35204

Lopez-Ruiz, H. G., 2008. *Facteur 4 et mobilité des personnes et des marchandises : quels scénarios pour la France en 2050*. Disponible sur : https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00277806

Lopez-Ruiz, H. G., 2009. *Environnement & Mobilité 2050 : des scénarios sous contrainte du facteur 4 (-75% de CO_2 en 2050)*. Thèse pour le doctorat en Sciences Economiques. Université de Lyon. Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00523839/

Lopez-Ruiz, H. G. & **Crozet**, Y., 2011. *La voie étroite du facteur 4 dans le secteur des transports : quelles politiques publiques, pour quelles mobilités?*

Manicore, 2012. *Comment va évoluer le prix du pétrole ?* [en ligne] Dernière modification : juillet 2012. Consulté le 30/08/2016. Disponible sur : https://www.manicore.com/documentation/petrole/prix_futur.html

Manicore, 2013. *Combien suis-je un esclavagiste ?* [en ligne] Dernière modification : août 2013. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : https://www.manicore.com/documentation/esclaves.html

Manicore, 2015. *Quelques séries longues sur l'énergie dans diverses régions du monde* [en ligne] Dernière modification : décembre 2015. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : https://www.manicore.com/documentation/chiffres_energie.html

Maplecroft, 2016. *Climate Change Vulnerability Index 2016*. Available on: http://reliefweb.int/report/chad/climate-change-vulnerability-index-2016

McGlade, C. & **Ekins**, P., 2015. *The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C*. Nature 517, 187–190 (08 January 2015). Available at: http://www.nature.com/articles/nature14016.epdf

MEDDE, 2012. *Information CO_2 des prestations de transport*. Application de l'article L. 1431-3 du code des transports. Guide méthodologique. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Information-CO2-des-prestations-de.html

MEDDE, 2015a. *Chiffres clés du climat*, France et Monde, Edition 2016. Collection Repères. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable, et de l'Energie. 60 p. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-chiffres-cles-du-climat-en.html

MEDDE, 2015b. *La loi de transition énergétique pour la croissance verte. Mode d'emploi de la loi et des actions qui l'accompagnent*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-loi-de-transition-energetique,40337

MEDDE, 2015c. *Stratégie nationale bas-carbone*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-nationale-bas-carbone.html

MEEM, 2016a. *Projet de Programmation Pluriannuelle de l'Energie*. Synthèse. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Programmation-pluriannuelle-de-l.html

MEEM, 2016b. *Stratégie de développement de la mobilité propre*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Strategie-de-developpement-de-la.html

Meilhan, N., 2016. *Pourquoi la voiture du futur ne pèse que 500 kg ?* [en ligne] Disponible sur : http://fr.slideshare.net/NicolasMeilhan/janvier-2013-frost-sullivan-pourquoi-la-voiture-du-futur-ne-pse-que-500-kg

Natixis, 2014. *Et si la crise de 2008-2009 avait aussi été déclenchée par un choc pétrolier ?* Disponible sur : http://cib.natixis.com/flushdoc.aspx?id=78481

Natixis, 2016. *Finalement, est-ce que le prix du pétrole n'explique pas l'essentiel des évolutions économiques observées ?* Disponible sur : http://cib.natixis.com/flushdoc.aspx?id=91394

négaWatt, 2013. *Scénario négaWatt. Dossier de synthèse*. Disponible sur : http://www.negawatt.org/scenario-negawatt-2011-p46.html

négaWatt, 2014. *Scénario négaWatt 2011-2050. Hypothèses et méthode*. Rapport technique. Disponible sur : http://www.negawatt.org/rapport-technique-p131.html

OCDE et FIT, 2015. *Perspectives des transports FIT*. Résumé en Français. Disponible sur : http://www.oecd-ilibrary.org/fr/transport/perspectives-des-transports-fit-2015_9789282107805-fr

Oil Man, 2010. *Tout va bien : le Peak Oil est atteint, dit l'Agence internationale de l'énergie* [en ligne]. Publié par Matthieu Auzanneau, le 18 novembre 2010. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : http://petrole.blog.lemonde.fr/2010/11/18/tout-va-bien-le-peak-oil-est-atteint-dit-lagence-internationale-de-lenergie/

Oil Man, 2014. *Gaël Giraud, du CNRS : « Le vrai rôle de l'énergie va obliger les économistes à changer de dogme »* [en ligne] Publié par Matthieu Auzanneau, le 19/04/2014. Consulté le 01/09/2016. Disponible sur : http://petrole.blog.lemonde.fr/2014/04/19/gael-giraud-du-cnrs-le-vrai-role-de-lenergie-va-obliger-les-economistes-a-changer-de-dogme/

OPECST, 2014. *Les nouvelles mobilités sereines et durables : concevoir et utiliser des véhicules écologiques*. Rapport de Mme Fabienne KELLER, sénateur et M. Denis BAUPIN, député, au nom de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 293 tome II (2013-2014) - 16 janvier 2014. Disponible sur : https://www.senat.fr/notice-rapport/2013/r13-293-2-notice.html

Orfeuil, J.-P., 2016. *Tous à moins de 30 minutes du travail. La ville cohérente*. Séance méthodologique, Forum Vies Mobiles, le 23/06/2016.

Our Finite World, 2015a. *What Greece, Cyprus, and Puerto Rico have in common* [online]. Posted by Gail Tverberg on July 8, 2015. Consulted on 01/09/2016. Available at: https://ourfiniteworld.com/2015/07/08/what-greece-cyprus-and-puerto-rico-have-in-common/

Our Finite World, 2015b. *Nine reasons why low oil prices may "morph" into something much worse*. Posted by Gail Tverberg on July 22, 2015. Consulted on 01/09/2016. Available

at: https://ourfiniteworld.com/2015/07/22/nine-reasons-why-low-oil-prices-may-morph-into-something-much-worse/

PASS, 2016. *The state of physical activity in Europe*. Narrative review. Available at: http://www.sportetcitoyennete.com/pass/

Quinet, E., 1998. *Principes d'Economie des Transports*. Economica

Razemon, O., 2014. *Le pouvoir de la pédale. Comment le vélo transforme nos sociétés cabossées*. Editions Rue de l'Echiquier.

RICARDO-AEA, 2015. *The potential for mass reduction of passenger cars and light commercial vehicles in relation to future CO_2 regulatory requirements*. Available at: http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/docs/ldv_downweighting_co2_report_en.pdf

Rocci, R., 2015. *Comment rompre avec l'habitude ? Les programmes d'accompagnement au changement de comportements de mobilité*, Espace populations sociétés [En ligne], 2015/1-2, mis en ligne le 01 juillet 2015, consulté le 27 juillet 2016. Disponible sur : http://eps.revues.org/6027

Santé publique France, 2016. *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de réduction de la pollution atmosphérique*. Disponible sur : http://invs.santepubliquefrance.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses

Sauvons le climat, 2014. *Diviser par quatre les rejets de CO_2 dus à l'énergie. Le scénario Négatep*. Disponible sur : http://www.sauvonsleclimat.org/best-of-slchtml/diviser-par-quatre-les-rejets-de-co2-dus-a-lenergie-le-scenario-negatep

Sénat, 2015. *Rapport fait au nom de la commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air*. Mme Leila AÏCHI. n° 610 tome I (2014-2015) - 8 juillet 2015. Disponible sur : http://www.senat.fr/notice-rapport/2014/r14-610-1-notice.html

Sétra, 2013. *Le plafonnement de l'usage de la voiture dans les années 2000. Revue de la littérature internationale*. Fiche n° 7 Mobilités à longue distance. Disponible sur : http://www.infra-transports-materiaux.cerema.fr/le-plafonnement-de-l-usage-de-la-voiture-dans-les-a5700.html

Singler, E., 2015. *Green nudge : Réussir à changer les comportements pour sauver la planète*. Edition Pearson.

SNCF, 2014. RER B : *2ème ligne la + fréquentée d'Europe* [en ligne]. Mis à jour le 10/03/2014. Consulté le 08/08/2016. Disponible sur : http://www.sncf.com/fr/presse/fil-info/RERB-retards-travaux

SNCF, 2015a. *Vers une mobilité sobre en CO_2 : Une opportunité pour vivre mieux ?* Regards croisés pour éclairer les choix de société en matière de mobilité des voyageurs. Disponible sur : http://www.sncf.com/ressources/facteur_4.pdf

SNCF, 2015b. *Etude prospective 2050, mobilité longue distance*. Prospective 2030 & 2050. Voyages SNCF – FSJ / DGPP – Document confidentiel.

SNCF, 2016. *Mobilité des français. Pratiques et perspectives*. Etude Kisio-IFOP pour SNCF. Disponible sur : http://www.sncf.com/ressources/facteur_4.pdf

The Shift Project Data Portal, 2016. *Historical energy production statistics*. Consulted on 01/09/2016. Available at: http://www.tsp-data-portal.org/Energy-Production-Statistics

Transilien, 2016. *Itinéraire en Île de France*. Consulté le : 08/08/2016. Disponible sur : https://www.transilien.com/

Transmissions, 2015. *Quelles mobilités pour le facteur 4 en 2050. Estimation des impacts 2013 et des impacts 2050*. Document détaillé de l'étude SNCF 2015.

Wrangham, R., 2009. *Catching fire: How cooking made us human*. Basic Books.

Sigles et abréviations

Instituts cités

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AIE : Agence internationale de l'énergie (IEA en anglais)
ALE : Alliance libre européenne
ANCRE : Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie
BP : British Petroleum
CAS : Centre d'analyse stratégique
CCNUCC : Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique
CEA : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEC : Chaire économie du climat
Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
Certu : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
CGDD : Commissariat général au développement durable
CGPC : Conseil général des Ponts et Chaussées
CIRED : Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CNB : Conseil national du bruit
COR : Conseil d'orientation des retraites
DGAC : Direction générale de l'aviation civile
DGEC : Direction générale de l'énergie et du climat
DGEMP : Direction générale de l'énergie et des matières premières
ECF : European cyclists' federation
EEA : European environment agency (AEE en français)
Fed : Réserve fédérale des Etats-Unis
FIT : Forum international des transports (ITF en anglais)
FUB: Fédération française des usagers de la bicyclette (ex-FUBICY)
GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GrDF : Gaz Réseau Distribution France
IDDRI : Institut du développement durable et des relations internationales
IEA : International Energy Agency (AIE en français)
IPCC : Intergovernmental panel on climate change (GIEC en français)
ITF : International transport forum (FIT en français)
JDP : Jury de déontologie publicitaire
LAET : Laboratoire aménagement économie des transports (ex-LET)
LaSUR-EPFL : Laboratoire de sociologie urbaine de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques
MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEEM)
MEEM : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (ex-MEDDE)
OCDE : Organisation de coopération et de développement économique

OPECST : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
PASS : Physical activity serving society
PREDIT : Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres
RAC : Réseau action climat
RTE : Réseau de transport d'électricité
Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
SNCF : Société nationale des chemins de fer français
UE : Union européenne
UFE : Union française de l'électricité
WWF : World wide fund

Sigles et abréviations utilisés

AME : avec mesures existantes
AMS : avec mesures supplémentaires
BAU : *business as usual*
BHNS : bus à haut niveau de service
BTT : budget temps-transport
CH_4 : méthane
CO_2 : dioxyde de carbone
COV : composés organiques volatils
DNTE : débat national sur la transition énergétique
ENTD : enquête nationale sur les transports et les déplacements
GES : gaz à effet de serre
GNV : gaz naturel véhicule
km : kilomètre(s)
kWh : kilowattheure
LD : longue distance
LTECV : loi de transition énergétique pour la croissance verte
Mds € : milliards d'euros
N_20 : protoxyde d'azote
NOx : oxydes d'azote
O_3 : ozone
PEN : permis d'émissions négociables
PIIGS : Portugal, Italy, Ireland, Greece, Spain
PL : poids-lourd
POPE : loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique
PPE : programmation pluriannuelle de l'énergie
SNBC : stratégie nationale bas-carbone
SO_2 : dioxyde de soufre
tep : tonne équivalent pétrole
$teqCO_2$: tonnes équivalent CO_2 (Mt : millions de tonnes)

TC : transports collectifs / en commun
TCAM : taux de croissance annuel moyen
TGV : train à grande vitesse
TICPE : taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques
t-km : tonne-kilomètre (Mds : milliards)
TRM : transport routier de marchandises
TVA : taxe sur la valeur ajoutée
UC : unité de consommation
UTCF : utilisation des terres, leurs changements et la forêt
VAE : vélo à assistance électrique
VE : véhicule électrique
v-km : voyageur-kilomètre (Mds : milliards)
VLS : vélo en libre-service
VP : voiture particulière
VUL : véhicule utilitaire léger

Annexe : Les fiches-résumées des scénarios étudiés

CGDD 2016 : la demande de transport sur le long terme

Auteurs et contexte

Le CGDD (Commissariat Général au Développement Durable) a présenté en février 2016 les résultats d'une étude de projections à 2030 et 2050 sur la demande de transports. L'objectif est d'obtenir une spatialisation des trafics modaux voyageurs et marchandises, et les indicateurs environnementaux (dont les émissions de CO_2) résultant des différents scénarios. Les résultats affichés ici sont ceux d'une présentation provisoire dont les résultats sont globalement très proches (CGDD, 2016c) de la publication finale (CGDD, 2016f).

Périmètre

L'exercice de projection concerne les transports intérieurs, répartis selon les catégories de voyageurs longue distance (> 100 km), courte distance (<100 km) et transport de marchandises. Il prend comme année de référence 2012 et donne les principaux résultats aux horizons 2030 et 2050.

Le modèle

Le modèle fonctionne sur la base d'hypothèses structurantes (démographie, croissance, prix de l'énergie) et d'une représentation fine des flux territoriaux et des infrastructures de transport actuelles et projetées. La répartition du trafic entre modes se fait via un coût généralisé correspondant au temps de parcours et aux coûts d'usages propres à chaque mode.

Les scénarios

Deux scénarios sont détaillés dans l'étude, mais de nombreuses variantes sont aussi testées avec plus ou moins de détails dans leurs hypothèses et résultats :

- ✓ Le scénario tendanciel est le plus détaillé des scénarios ;
- ✓ Le scénario volontariste SNBC (Stratégie nationale bas-carbone), dont les résultats sont présentés pour la courte distance et le transport de marchandises : l'objectif est d'atteindre une réduction des émissions de 29% pour 2024-28 par rapport à 2013, et réduire les émissions d'au moins 70% d'ici 2050 (MEDDE, 2015c) ;
- ✓ Des variantes sont testées, avec mobilité et PIB hauts et bas, ou avec l'évaluation de l'impact sur les projections à 2030 de l'ajout des autocars ou du covoiturage.

Les principales hypothèses qui changent à horizon 2050 entre le scénario tendanciel et le scénario SNBC concernent :

- ✓ La densification plus importante des centres ;
- ✓ La stabilisation de la distance moyenne de déplacement à partir de 2030 ;
- ✓ Le report de la voiture particulière (VP) vers les vélos (baisse supplémentaire de 3 points de la part modale de la VP) ;
- ✓ Une hausse de 20% du taux d'occupation des voitures ;
- ✓ Une baisse des émissions des VP à 30 gCO_2/km, en grande partie due au développement des véhicules électriques qui représentent 55% du parc ;

- ✓ Pour le transport de marchandises : prise en compte de progrès logistiques importants, baisse plus forte des consommations unitaires et utilisation d'une source d'énergie non fossile (ici électrique) pour une partie du transport routier de marchandises (TRM).

Principaux résultats

Parts modales

La demande de transport de voyageurs augmente de 36% d'ici à 2050 pour le scénario tendanciel et de 28 % pour le cadrage SNBC. La part de la voiture reste très majoritaire (passage de 84,4% en 2012 à 77,5% en tendanciel et 75,9% en SNBC), mais sa légère baisse en relatif se fait au bénéfice des transports en commun qui voient leur trafic doubler.

Côté transport de marchandises, la croissance économique entraine quasiment un doublement du trafic d'ici 2050 avec des parts modales à peu près inchangées. De manière surprenante, le scénario volontariste prévoit une part modale du fret routier légèrement supérieure (88,1%) que dans le scénario tendanciel (85,2%), en raison de l'optimisation du transport routier supposée dans le cadrage SNBC.

Facteur 4 et réduction des émissions

L'évaluation des impacts des scénarios tendanciel et SNBC sur les émissions de CO_2 (Figure 33) montre que le scénario tendanciel ne permet d'atteindre qu'une diminution de 34% des émissions entre 2012 et 2050. Le facteur 2 est atteint pour le transport de voyageurs, mais la hausse de 26% des émissions du fret vient réduire ces progrès.

Quant au scénario SNBC, il ne permet pas non plus d'atteindre l'objectif de facteur 4 dans les transports, ni l'objectif de 70% fixé dans la stratégie nationale bas-carbone, puisque la réduction totale atteint 63%. La réduction est à nouveau beaucoup plus forte pour le transport de voyageurs (-70%) que pour le transport de marchandises (-25%).

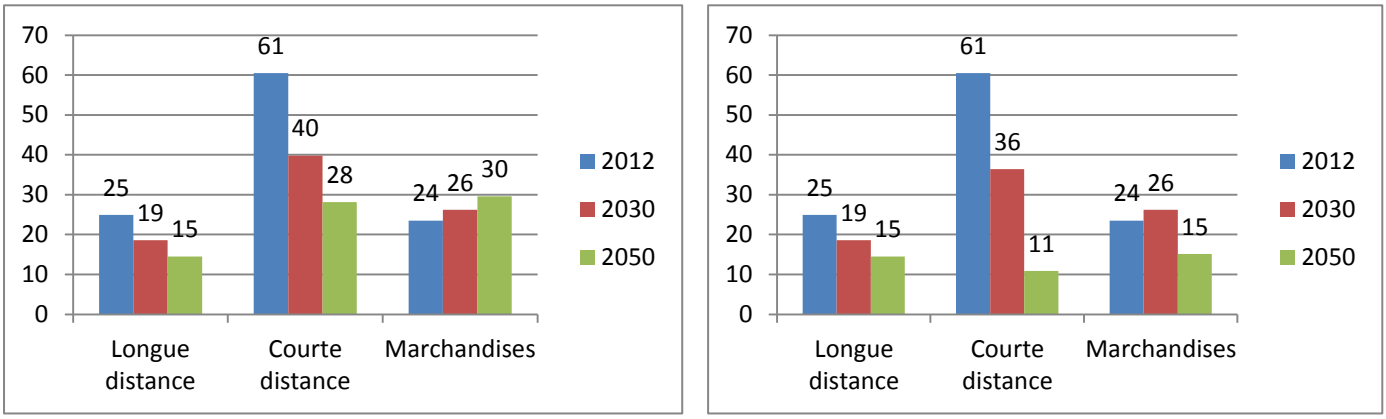


Figure 33 : Emissions de CO_2 (en $MtCO_2$) du transport de voyageurs et de marchandises dans les scénarios tendanciel (à gauche) et SNBC (à droite)

DGEC 2014-15 : scénarios prospectifs Energie-Climat-Air à l'horizon 2035

Auteurs, contexte et périmètre

La Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC) fait partie du ministère de l'environnement (MEDDE au moment de l'étude) et a pour mission d'élaborer et de mettre en œuvre la politique relative notamment à l'énergie et au climat, et est responsable à ce titre de rapports statistiques et de travaux de prospective « énergie-climat ». Cette étude s'intègre dans la loi de transition énergétique, avec un enjeu de reporting, de suivi et aussi d'évaluation macroéconomique des scénarios.

Les scénarios sont à horizon 2035 contrairement aux autres études étudiées dans ce rapport. Cela rend donc les résultats peu comparables avec les autres scénarios, mais le choix a été fait de résumer cette étude pour le statut de référence de cet étude pour la conduite de la politique française de transition énergétique. Le périmètre des émissions est celui du protocole de Kyoto, correspondant aux émissions nationales de six gaz à effet de serre pour la Métropole, les DROM et les COM. L'aviation internationale ne fait pas partie de ce périmètre, mais elle est néanmoins incluse dans certains résultats présentés dans le rapport (DGEC, 2015).

Le modèle

Le pilotage de l'étude est réalisé par la DGEC, en collaboration avec le CGDD et l'ADEME, et avec la participation de nombreux services et institutions partenaires. Les projections de demande d'énergie ont été réalisées avec les modèles Med-Pro et POLES, et la modélisation macro-économique par les modèles NEMESIS (Seureco/Erasme) et ThreeMe (ADEME).

Les deux projections sont réalisées avec un cadrage macro-économique commun, mais avec une différence sur les politiques et mesures prises en compte dans chacun des scénarios :

- ✓ Le scénario avec mesures existantes (AME), où sont retenues uniquement les mesures effectivement adoptées et mises en œuvre au 1er janvier 2014 ;
- ✓ Le scénario avec mesures supplémentaires (AMS2), où sont ajoutées les politiques et mesures adoptées ou annoncées après le 1er janvier 2014, en particulier les mesures et objectifs prévus par la LTECV.

Principaux résultats

Parts modales

Les parts modales ne sont pas toutes indiquées dans la même unité, rendant la comparaison difficile, cependant les évolutions suivantes peuvent être relevées :

- ✓ Le trafic en milliards de véhicules-km augmente de 10% dans le scénario AME et baisse de 12% dans le scénario AMS2 entre 2010 et 2035 ;
- ✓ La hausse du trafic ferroviaire de passagers est respectivement de 35% et 45% dans les scénarios AME et AMS2 (en Mds v-km) ; le trafic de bus et taxis est en hausse de 46% et 170 % respectivement ;
- ✓ Le trafic aérien domestique et de transit en nombre de passagers est un peu plus que doublé dans les 2 scénarios ;

- ✓ Enfin, le trafic de marchandises subit aussi la même évolution dans les 2 scénarios, avec une hausse du trafic de 64% (485,5 Mds t-km en 2035), et tous les modes subissent une forte hausse : quasiment un triplement en 25 ans pour le ferroviaire (de 30,0 à 83,4 Mds t-km), +50% pour le routier et +91% pour le fluvial.

Consommations énergétiques

Au niveau global, les consommations énergétiques finales restent constantes dans le scénario AME et baissent de 23,9% dans le scénario AMS2 entre 2010 et 2035. En 2030, la baisse est de 21,9% par rapport à 2012, l'objectif de -20% de la LTECV est donc dépassé, de même que l'objectif de diminuer de 30% la consommation primaire d'énergie fossile entre 2012 et 2030 (-39,3% dans AMS2 mais seulement -1,6% dans AME).

Concernant les transports, les consommations finales peuvent atteindre jusque 35% de plus lorsque le transport aérien international est inclus (Figure 34). Les consommations augmentent de 10% ou sont stables pour le scénario AME, et baissent de 19% ou 32% dans le scénario AMS2 selon que l'aérien international est inclus ou non.

Le parc total de VP et VUL atteint quasiment 40 millions de véhicules en 2035 dans les 2 scénarios, contre 36 millions en 2010. Même dans le scénario AMS2, le parc reste dominé à 85% par les motorisations essence et diesel, malgré la légère percée des véhicules hybrides rechargeables (8,8%) et électriques (5,5%).

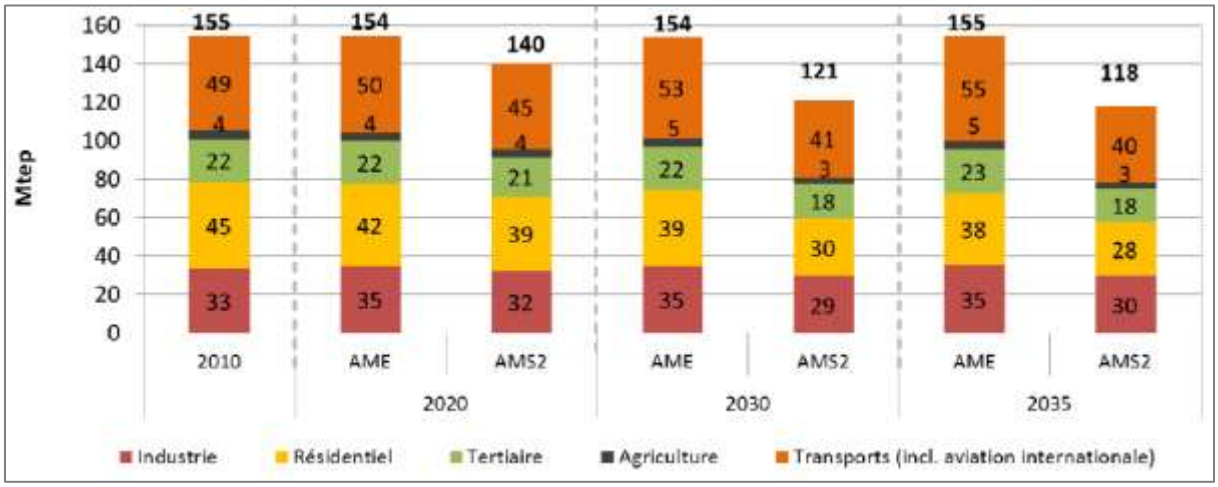


Figure 34 : Projections de la demande finale d'énergie par secteur et par scénario (format SOeS ; source Enerdata dans DGEC, 2015)

Facteur 4 et réduction des émissions

Les émissions de gaz à effet de serre sont calculées entre 1990 et 2030 avec le périmètre de Kyoto, donc hors trafic international. Les réductions globales sont de 15,4% pour le scénario AME et de 42,6% pour le scénario AMS2, hors UTCF.

Pour le secteur des transports, les émissions augmentent de 7% dans le scénario AME et diminuent de 30% dans le scénario AMS2. Ces moins bons résultats comparés à la réduction globale montrent la difficulté de décarboner le secteur des transports à moyen terme.

Enseignements pour les politiques publiques

Au-delà des résultats donnés par les scénarios en termes de consommation d'énergie et de réduction de gaz à effet de serre, les modélisations macroéconomiques fournissent des résultats complémentaires intéressants:

- ✓ Les résultats de l'évaluation macro-économique montrent dans les 2 scénarios un résultat positif tant sur la croissance (Figure 35) que sur l'emploi pour le scénario AMS2 comparé au scénario AME. En effet, le supplément annuel moyen de PIB est estimé à environ 25 milliards d'euros pour NEMESIS et de 30 à 35 milliards d'euros pour ThreeME, tandis que les emplois supplémentaires sont au nombre de 108 000 pour NEMESIS et de 300 000 à 350 000 pour ThreeME comparé au scénario AME ;
- ✓ D'après NEMESIS, les investissements nécessaires dans le domaine des transports sont estimés à environ 3 milliards d'euros par an dans le scénario AME, et entre 4 et 6 milliards d'euros dans le scénario AMS2.

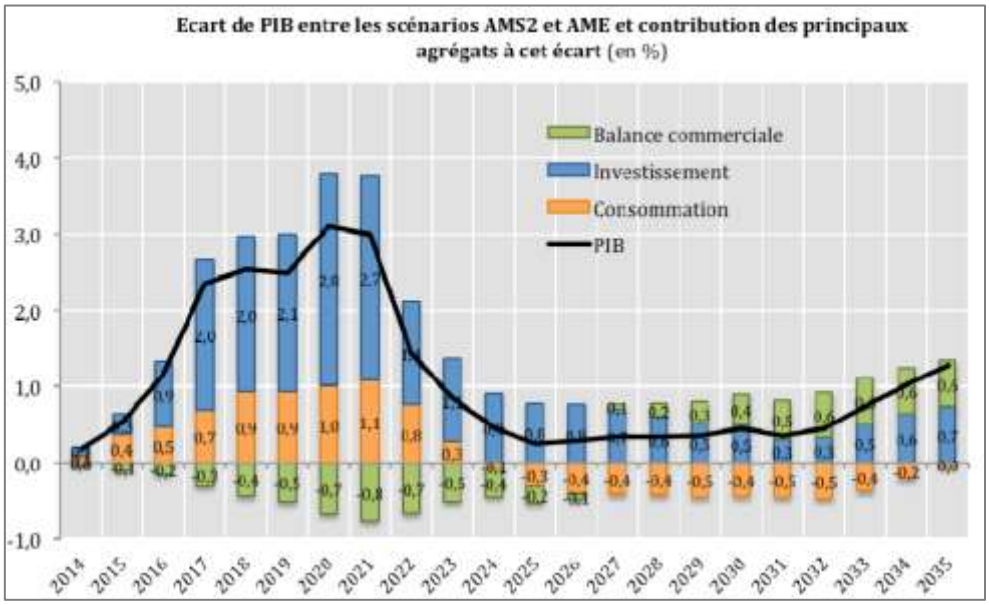


Figure 35 : Ecart de PIB entre AMS2 et AME dans NEMESIS (source Seureco-Erasme, dans DGEC, 2015)

Remarques

- ✓ Les chiffres de ce scénario constituent une bonne illustration des différences importantes en termes d'énergie finale consommée et donc d'émissions de gaz à effet de serre des transports, selon que le secteur aérien international est pris en compte ou non. Il en va bien évidemment de même avec la prise en compte du trafic de marchandises maritime international ;
- ✓ On peut noter malgré la forte dépendance aux hypothèses et au fonctionnement des modèles macroéconomiques, que les effets d'une transition énergétique volontariste sont évalués comme étant positifs à long terme pour l'économie.

SNCF 2015 : vers une mobilité sobre en CO_2

Auteurs, contexte et périmètre

La SNCF a publié au lendemain de la COP21 une étude sur les évolutions possibles de la mobilité des personnes en France à horizon 2050 et leurs impacts environnementaux. L'année 2013 est prise comme référence, et le transport aérien n'est pas pris en compte.

Le choix a été fait de croiser les regards avec des contributions importantes notamment du Laboratoire de Sociologie Urbaine (LaSUR de l'EPFL), mais aussi de l'ADEME, Trans-Missions et OuiShare (SNCF, 2015a). Une enquête IFOP auprès de 1800 Français de 15 ans et plus, vient à la fois compléter et enrichir l'étude, en la mettant en perspective avec les aspirations des Français en matière de mobilité (Figure 36 ; SNCF, 2016).

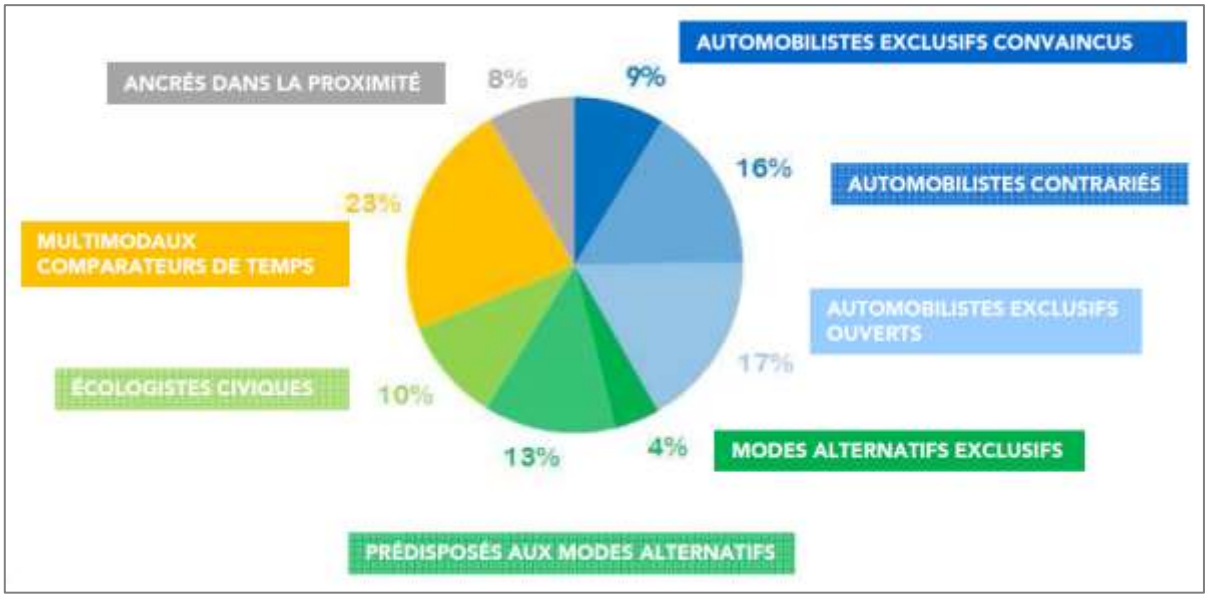


Figure 36 : Typologie de choix modal (d'après Enquête SNCF, 2016)

Le modèle et les scénarios

Le modèle utilisé n'est pas détaillé. Les hypothèses sont fortement détaillées dans la publication principale, essentiellement de manière qualitative (voir les déterminants pour chaque scénario dans le Tableau 7, page suivante).

Les 3 scénarios sont centrés sur l'individu et sa demande de mobilité, afin d'explorer des futurs possibles, à la fois contrastés et réalistes, et dotés d'une cohérence interne :

- ✓ Ultramobilité : toujours plus vite, toujours plus loin. Les tendances actuelles de grande mobilité, communication à distance et des modes routiers prédominants continuent à l'avenir ;
- ✓ Altermobilité : se déplacer autrement. La grande mobilité et la communication à distance continuent à se développer, cependant le recours à l'automobile est limité au profit des modes de déplacements alternatifs (multimodalité, vélo, transports collectifs) ;
- ✓ Proximobilité : la qualité de vie de la proximité. Dans ce scénario, c'est l'aspiration à une qualité de vie à proximité de chez soi qui est privilégiée, tandis que les modes de déplacements alternatifs sont développés.

Tableau 7 : Principaux déterminants de la mobilité dans les trois scénarios 2050 (résumé d'après SNCF, 2015a)

	ULTRAMOBILITE	ALTERMOBILITE	PROXIMOBILITE
Valeurs	Voyager vite et loin reste une valeur dominante	Se déplacer autrement. Moindre attractivité du mode automobile	Valorisation de la qualité de vie de proximité
Urbanisme et choix résidentiel	L'étalement urbain continue	L'étalement urbain continue, mais dans des proportions plus faibles	Etalement urbain stoppé, densification modérée des espaces peu denses
Importance de la localisation du travail pour le choix résidentiel	Faible	Modérée	Forte
Portée des déplacements quotidiens	Augmentation forte	Légère augmentation	Forte diminution
Portée des déplacements longue distance	Augmentation : grande mobilité	Augmentation : grande mobilité	Légère augmentation
Organisation des déplacements	Système automobile complet, TC organisés autour des pics de fréquentation	Modes actifs sécurisés, système altermobile complet sur la majeure partie de la France	Modes actifs sécurisés, système altermobile complet sur la quasi-totalité de la France
Répartition de l'usage de la voirie	Majoritairement dédiée à l'automobile	Equilibrée entre marche, vélo, TC et automobile	Majoritairement dédiée à la marche, vélo, TC et à la voiture partagée
Modes partagés qui connaissement un fort développement	Autocars, covoiturage	TCU, auto-partage, covoiturage	TCU, auto-partage, covoiturage, minibus / taxis partagés
Rabattement vers les gares	TC dans les grandes agglomérations, voiture ailleurs	TC, marche, vélo, covoiturage / taxis partagés	TC, marche, vélo, covoiturage / taxis partagés
Trains du quotidien	Croissance sur certains territoires où la demande est déjà forte	Forte hausse	Très forte hausse
Trains longue distance	Croissance de la grande mobilité liée au travail	Forte hausse de la grande mobilité liée au travail, amélioration de la connexion avec les TC locaux	Forte hausse, amélioration de la connexion avec les TC. Report d'une partie des voyages précédemment à l'étranger
Dépendance à la voiture individuelle possédée	Forte sur la majorité du territoire sauf zones très denses	Faible en zone dense, modérée ailleurs	Très faible en zone dense et dans le péri-urbain, modérée dans les zones peu denses

Le tableau ci-dessus indique les évolutions, qui résultent des aspirations des voyageurs, mais qui sont également accompagnées par l'action des acteurs publics et privés, indispensables pour faire évoluer le contexte socio-économique vers ces tendances.

Principaux résultats et enseignements

Parts modales

Dans le scénario altermobilité, la demande de mobilité augmente de 30%, elle augmente de 10% dans le scénario d'altermobilité et elle est stable pour le scénario proximobilité. La part de la voiture passe de 74,1% des v-km en 2013 à 71,0% pour l'ultramobilité, 63,5% pour l'altermobilité et baisse à 54,5% pour le scénario de proximobilité (Figure 37).

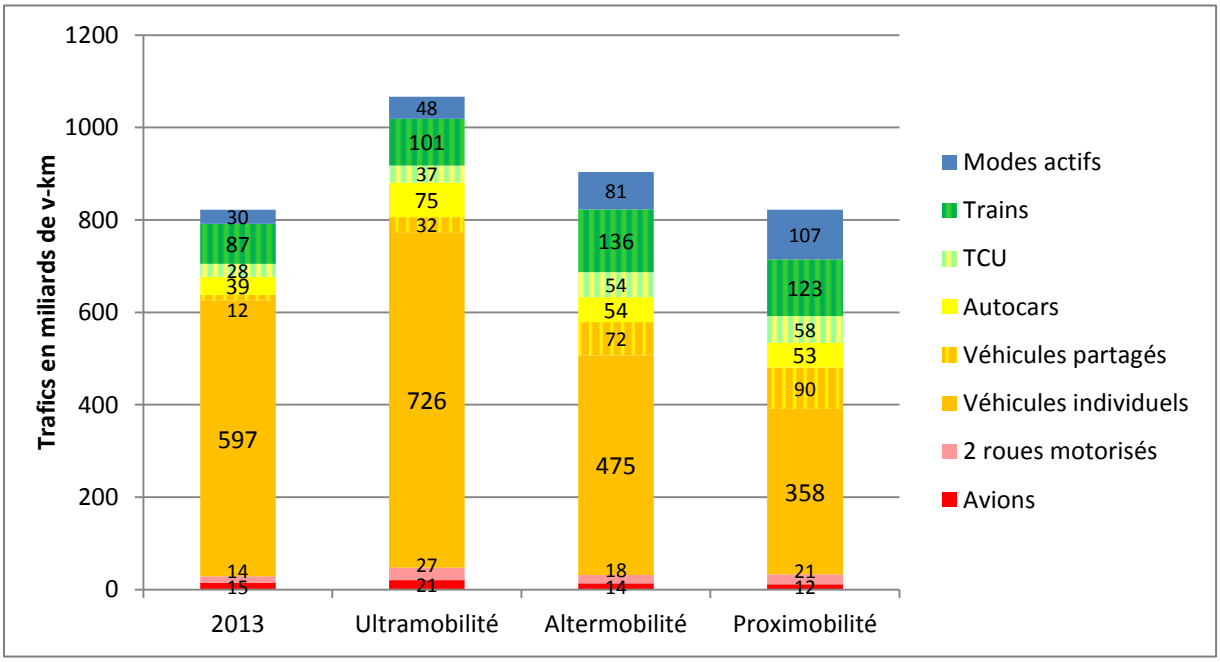


Figure 37 : Trafics et parts modales en 2013 et dans les 3 scénarios (repris d'après données SNCF, 2015a)

Facteur 4 et réduction des émissions

Seul le scénario de proximobilité permet d'atteindre l'objectif fixé aux transports pour la contribution au facteur 4. Cette contribution confirmée par la Stratégie Nationale Bas Carbone donne un objectif de diminution de 65% des émissions entre 1990 et 2050, ce qui revient à diminuer à 30 Mt CO_2 les émissions des transports (Figure 38).

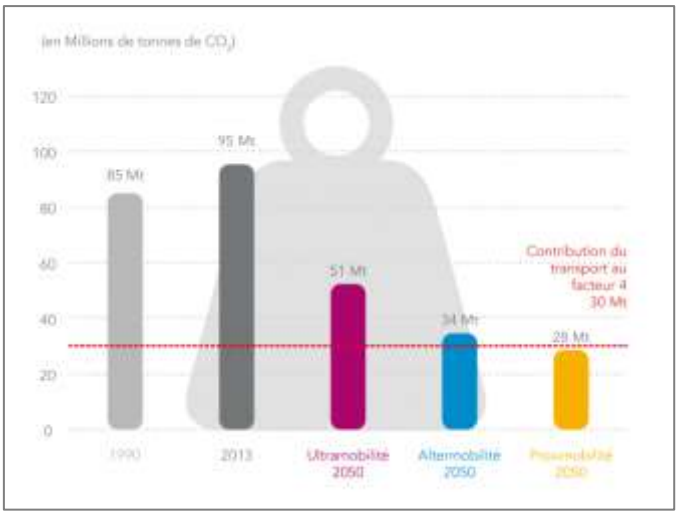


Figure 38 : Emissions de CO_2 des transports dans les 3 scénarios (SNCF, 2015a)

Une originalité de cette étude est d'évaluer également l'impact des scénarios sur d'autres externalités négatives et positives des transports :

- ✓ L'accidentologie, en tenant compte des impacts des accidents de la circulation sur les vies humaines et les blessés graves ;
- ✓ Le coût économique de la congestion sur la perte de temps productif et sur la hausse des coûts de transport des marchandises ;
- ✓ La pollution atmosphérique locale, en termes d'impacts chiffrés sur la santé et l'environnement dus aux oxydes d'axode (NOx), composés organiques volatils (COV), ozone (0_3), particules en suspension ($PM_{2,5}$) et dioxyde de soufre (SO_2) ;
- ✓ Et enfin l'externalité positive sur la santé que représente la pratique des modes actifs que sont la marche et le vélo, plus développés dans les scénarios altermobilité et surtout proximobilité.

La monétarisation de ces impacts et bénéfices permet de mettre en avant les bénéfices supplémentaires scénarios altermobilité et proximobilité, qui permettent des bénéfices respectivement de 70 et 100 milliards d'euros par an, comparés à l'année 2013 ou au scénario d'ultramobilité. Sous les hypothèses de croissance économique de 1% par an retenues dans l'étude, ce montant de 100 milliards représenterait environ 3,5% du PIB en 2050 (Figure 39).

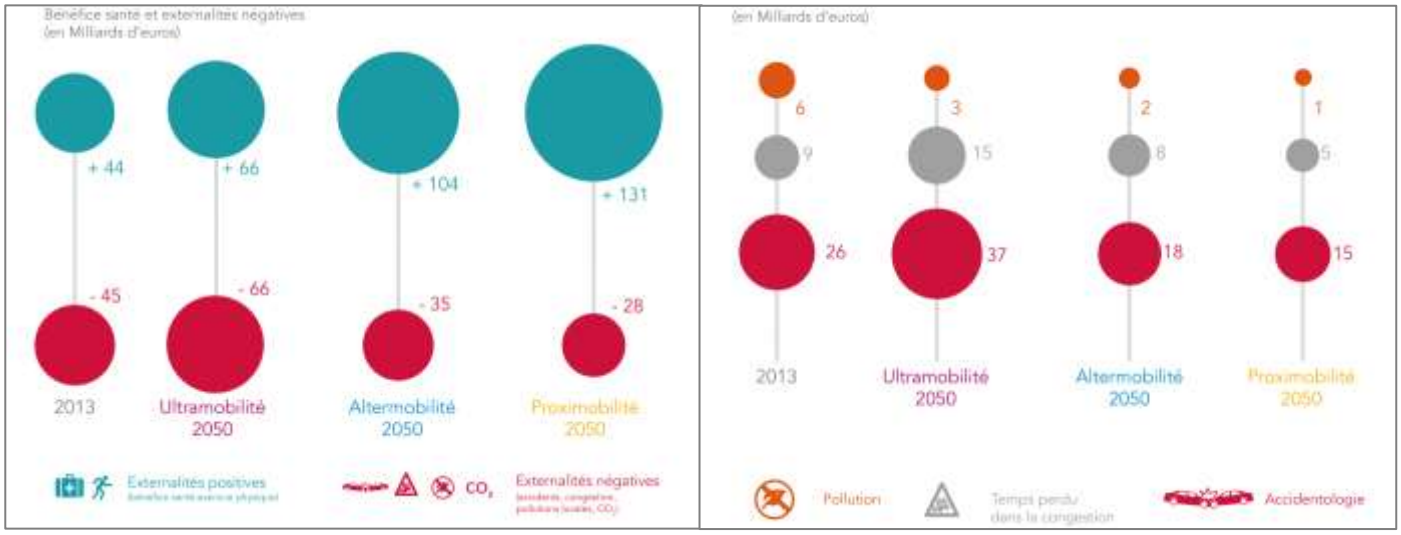


Figure 39 : Bilan des externalités positives et négatives (à gauche) et détail des externalités négatives (à droite) pour chaque scénario (SNCF, 2015a)

Voyages SNCF 2015 : étude prospective 2050 mobilité longue distance

Auteurs, contexte et périmètre

La direction grands projets et prospective (DGPP) de Voyages SNCF a mené une étude en 2015 afin d'évaluer des scénarios contrastés pour l'avenir de la mobilité voyageurs à longue distance, et notamment la place du TGV. Le périmètre est donc limité ici au secteur du transport longue distance en France, avec 2013 comme référence et avec une prospective à 2030 et 2050 (SNCF, 2015b).

Le modèle et les scénarios

Le modèle utilisé n'est pas développé, mais les évolutions propres à chaque scénario sont détaillées, en voici les principales caractéristiques :

- ✓ Un scénario **tendanciel**, qui prolonge les tendances actuelles, avec une croissance plus faible que dans le passé à 0,8% par an, les prix de l'énergie instables en tendance haussière, une poursuite des progrès technologiques, des prix croissants pour le train ;
- ✓ **Catastrophe économique**, où l'économie entre en décroissance durable à 1,4% par an, un vieillissement du réseau ferroviaire, une frugalité subie qui rend les consommateurs opportunistes et désintéressés de la transition énergétique ;
- ✓ **Société fondée sur la sobriété**, par une prise de conscience des individus d'une indispensable modification des comportements, réduisant également les inégalités, favorisant les innovations et le développement des NTIC au service de la frugalité ;
- ✓ **Nouvelle gouvernance européenne**, qui obtient plus de pouvoirs et lance des programmes ambitieux de réglementation, de fiscalité et d'investissements notamment pour la transition énergétique et les infrastructures de transports en commun ;
- ✓ **Innovations technologiques**, où ces innovations créent une rupture en redynamisant la croissance économique à 2% par an, et profitant au développement du TGV.

Principaux résultats

Il apparait que le train peut préserver ses parts de marché, hors scénarios de crise, et peut même l'augmenter fortement dans des scénarios de fortes ruptures en termes réglementaires ou d'innovations. Au contraire, l'atteinte du facteur 4 dans la mobilité voyageurs longue distance semble très difficile, un facteur 2 au mieux étant atteint dans les scénarios de sobriété et de gouvernance européenne (Tableau 8).

Tableau 8 : Principaux résultats des scénarios concernant la mobilité longue distance (SNCF, 2015b)
Les plus fortes et plus faibles valeurs par critère sont en gras

	Trafic tous modes en millions de voyageurs (et évol. depuis 2013)	Evolution du trafic fer entre 2013 et 2050	Part de marché du fer dans la mobilité LD	Consommation d'énergie en Mtep (évol. depuis 2013)	Emissions de CO_2 en $MtCO_2$ (évol. depuis 2013)
En 2013	*577*		*28%*	*7,6*	*27*
Tendanciel	721 (+25 %)	-5%	21%	7,6 (0 %)	**25 (-5%)**
Catastrophe économique	**458 (-21 %)**	**-78%**	**8%**	5,3 (-30 %)	17 (-37 %)
Société fondée sur la sobriété	705 (+22 %)	+22%	28%	5,4 (-29 %)	14 (-48 %)
Nouvelle gouvernance européenne	878 (+52 %)	**+165%**	**49%**	**4,6 (-39 %)**	**13 (-52 %)**
Innovations technologiques	**1138 (+97 %)**	+133%	33%	**8,8 (+16 %)**	24 (-10 %)

Négatep 2014 : diviser par quatre les rejets de CO_2 dus à l'énergie

Auteurs, contexte et périmètre

Le scénario Négatep a été créé par l'association Sauvons le climat, dans l'objectif de diviser les rejets de CO_2 dus à l'énergie, essentiellement en passant par la substitution des énergies fossiles par l'électricité décarbonée (nucléaire et renouvelable) et la biomasse. Le scénario prend l'année 2012 comme référence et se projette à horizon 2050 (Sauvons le climat, 2014).

Le modèle et les scénarios

Le fonctionnement du modèle n'est pas détaillé dans la publication. Deux scénarios sont comparés afin de mettre en perspective leurs résultats :

- ✓ Le scénario de référence SR 2008 de la DGEMP couvrant la période 2020-2030, qui a été extrapolé linéairement à 2050. Il correspond au scénario « *business as usual* » ;
- ✓ Le scénario Négatep, qui vise à se rapprocher du facteur 4 par les économies d'énergie et le remplacement des énergies fossiles par des sources non émettrices de CO_2 (Figure 40).

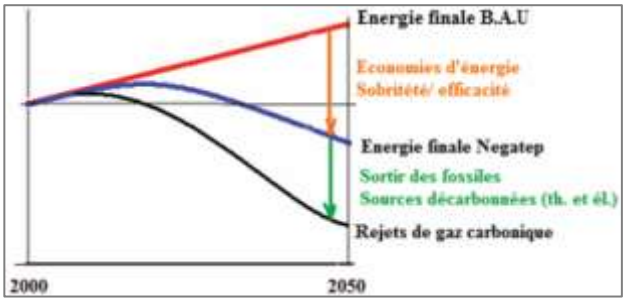


Figure 40 : L'approche globale Négatep (Sauvons le climat, 2014)

Principaux résultats et enseignements

Parts modales

Les parts modales ne sont pas détaillées, mais les économies d'énergies reposent sur 4 grands types d'hypothèses :

- ✓ La poursuite des progrès technologiques sur les véhicules, avec des consommations de pétrole de 30 à 40 % plus faibles aussi bien pour les voitures individuelles que pour les poids lourds ;
- ✓ Les transferts de la voiture individuelle vers les transports en commun et le covoiturage ;
- ✓ Du report modal pour le transport de marchandises, depuis les transports routiers vers le ferroviaire et le fluvial ;
- ✓ Enfin des hypothèses qui apparaissent optimistes sur la demande en transports aériens (vols intérieurs), qui pourrait diminuer de près de 50 %.

Facteur 4 et réduction des émissions

Les consommations d'énergie finale des transports sont à peu près divisées par 2 dans le scénario Négatep, alors qu'elles augmentaient de plus de 60 % dans le scénario *business as usual* (BAU). Le nouveau mix énergétique des transports se compose à 40 % de biocarburants, à 32 % d'électricité, à 20 % de pétrole, puis de 8 % de biogaz.

Au niveau global, la consommation d'énergie baisse de 18 %. Une partie des usages est transférée sur l'électricité dont la consommation double quasiment. La part importante du nucléaire est maintenue au prix de la construction de nouvelles centrales. Le scénario permet d'atteindre un facteur 3,95 sur les émissions de CO_2 liées à l'énergie, alors que le scénario business as usual ne permettait qu'une baisse de 38 % des émissions (facteur 1,6).

Enseignements pour les politiques publiques

Quelques enseignements et pistes de réflexion concernent les politiques de mobilité, ou plus globalement la gestion de la transition énergétique dans son ensemble :

- ✓ Un potentiel important est accordé au chargement des véhicules électriques la nuit dans le cadre d'un mix électrique fortement nucléaire. En effet, les centrales nucléaires ayant une production peu pilotable à court terme, recharger deux tiers du parc de véhicules électriques prévu durant la nuit permettrait d'absorber une grande partie de l'écart de consommation jour/nuit ;
- ✓ Dans la modélisation, le scénario prend une hypothèse intéressante concernant la réalisation des économies d'énergies projetées. En raison des potentiels retards, de l'inertie du système et de l'effet rebond, un taux réel de "réussite" de 70% est appliqué, afin d'anticiper d'éventuelles hypothèses trop optimistes ;
- ✓ Concernant le transport de marchandises, il est noté que les reports vers le ferroviaire et le fluvial resteront limités. Selon eux, seulement 30 % environ du fret permettrait ce type de report modal, possible essentiellement pour des distances moyennes.

Le scénario met l'accent sur l'importance de l'évaluation économique du scénario, en termes notamment d'investissements nécessaires.

- ✓ Pour les besoins liés à la mobilité, il est évalué un besoin d'investissements de 300 milliards d'euros sur 40 ans pour les batteries, et 200 milliards d'euros pour les grands travaux de transport (contre 100 milliards en BAU). Les dépenses totales sur les 40 ans seraient légèrement plus faibles pour le scénario Négatep que pour le scénario BAU, en raison des économies de combustibles fossiles et malgré les investissements plus élevés (Figure 41) ;
- ✓ Les dépenses totales du scénario Négatep sont cependant plus élevées que dans le scénario du statu quo, en raison des coûts d'investissement importants pour l'efficacité énergétique, les renouvelables ou les besoins d'infrastructures. En revanche, il apparait que ce surcoût est très dépendant des hypothèses sur l'évolution du prix des énergies fossiles et du niveau de taxe carbone appliqué.

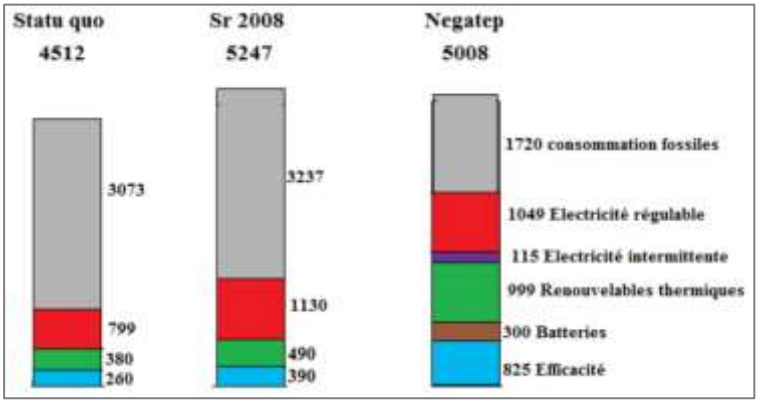
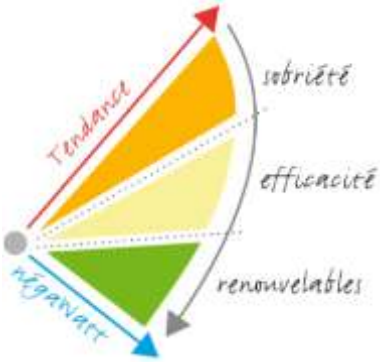


Figure 41 : Répartition des postes de dépenses cumulées (investissement et fonctionnement) évaluées, sur une période de 40 ans, selon 3 horizons différents, en Mds € (Sauvons le climat, 2014)

- ✓ Enfin, Négatep plaide pour l'énergie nucléaire notamment en raison de son coût qui serait bien moins élevé qu'un développement très massif des énergies renouvelables, pour des impacts semblables sur les émissions de CO_2. Cependant, sans rentrer dans le détail sur les coûts de ces filières, on peut au moins noter que les coûts globaux du nucléaire sont sujets à de forts débats. De même, il faut noter que ce scénario ne respecte pas les objectifs que la France s'est fixée dans la loi de transition énergétique concernant le nucléaire : 50% de part du nucléaire dans l'électricité en 2025 et le plafonnement de la puissance installée à 63,2 GW.

NégaWatt 2011 : sobriété, efficacité, et renouvelable



Auteurs et contexte

L'association négaWatt publie depuis 2003 un scénario connu pour son niveau d'ambition important et son triptyque « sobriété, efficacité, renouvelable ». Le scénario a d'abord été actualisé en 2006, puis en 2011, version utilisée ici. Certaines données ont fait l'objet d'une mise à jour en 2013 pour le dossier de synthèse (négaWatt, 2013) et le rapport technique (négaWatt, 2014) dans lequel les hypothèses et les résultats sont détaillés.

Périmètre

Le scénario négaWatt 2011 consiste en une analyse prospective entre 2010 et 2050 des systèmes énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre en France métropolitaine, y compris les émissions importées. L'année de référence concernant les hypothèses détaillées du transport est 2008. Les émissions du transport aérien international sont prises en compte, mais pas les émissions du transport maritime international.

Le modèle

Le modèle utilisé est purement physique et de type « bottom-up », c'est-à-dire basé sur un découpage sectoriel des usages de l'énergie (chaleur, mobilité et électricité spécifique). Le scénario s'appuie sur le modèle Afterres2050 concernant l'usage des sols et l'agriculture.

Concernant les transports, la méthodologie distingue la mobilité des personnes selon différentes catégories :

- ✓ Le mode de transport parmi 11 modes identifiés, depuis l'avion à la marche et au vélo, en passant par les véhicules routiers individuels à collectifs ainsi que trois catégories de transport ferroviaire ;
- ✓ Le type de mobilité, en 3 catégories : mobilité régulière et locale, longue distance (plus de 80 km du domicile) et les autres déplacements non classables ;
- ✓ L'urbanisme et la densité de la zone considérée (pour la mobilité régulière et locale), avec 10 classes depuis Paris à l'espace à dominante rurale. Les trajets à longue distance sont eux décomposés en 8 longueurs de moins de 100 km à plus 1500 km.

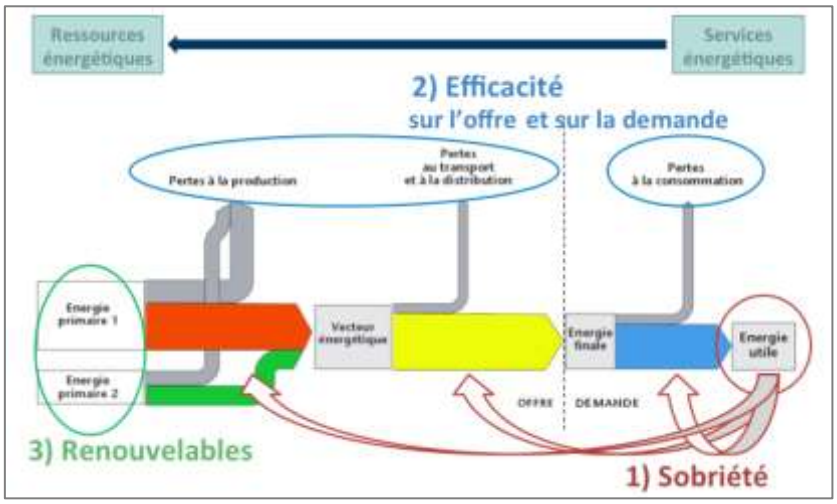


Figure 42 : Priorités de la démarche négaWatt

Le scénario

L'objectif affiché par le scénario est de faire face à l'épuisement des ressources énergétiques, de faire face à l'urgence climatique, mais aussi d'assurer la sortie de l'énergie nucléaire. La démarche du scénario de prospective négaWatt repose sur une analyse en trois temps (Figure 42) :

- ✓ La sobriété d'abord, consistant à interroger les besoins de services énergétiques, par un meilleur dimensionnement des équipements (nombre de m² des logements, poids des voitures…), une sobriété dans les usages (niveau et durée d'utilisation) ainsi qu'une sobriété coopérative (urbanisme, covoiturage, mutualisation…), questionnant ainsi les comportements individuels et collectifs ;
- ✓ L'efficacité ensuite, grâce au déploiement de solutions essentiellement techniques pour réduire les pertes énergétiques depuis son utilisation jusqu'à la production ;
- ✓ Les énergies renouvelables enfin, avec un remplacement progressif des énergies fossiles et nucléaire par des sources moins polluantes et plus soutenables.

L'originalité de la démarche est donc de prioriser la diminution des consommations via la sobriété et l'efficacité, pour permettre aux renouvelables de prendre une part majoritaire du mix énergétique national. Aussi le scénario s'appuie uniquement sur des technologies déjà disponibles à ce jour, donc sans prévoir de rupture technologique. La faisabilité technique est donc un argument fort du scénario, tandis que la faisabilité politique, économique ou l'acceptabilité sociétale et comportementale des changements restent peu évaluées.

Principaux résultats et enseignements

Parts modales

Entre 2008 et 2050, la mobilité totale des voyageurs diminue de 7,5% au niveau global, soit une diminution de 20% de la mobilité voyageurs, baisse qui est surtout marquée pour la mobilité longue distance et l'avion (Figure 43).

Le volume de transport de marchandises est en très légère baisse, avec une forte augmentation de la part du fret ferroviaire qui est multiplié par 3,6 pour atteindre 40% du transport de marchandises en se substituant surtout aux tracteurs routiers longue distance.

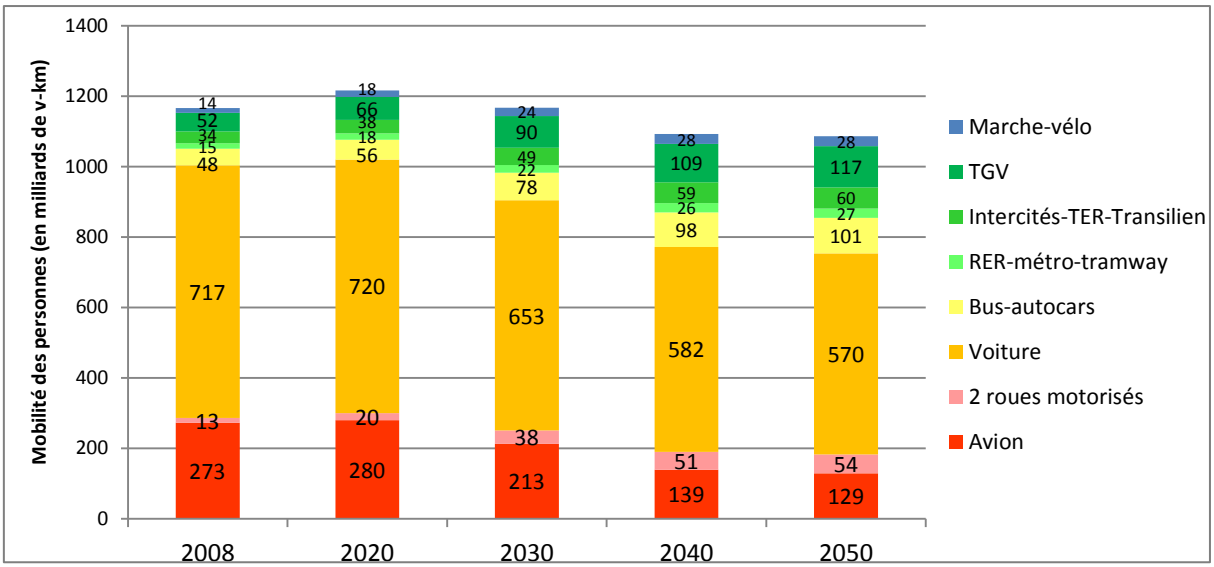


Figure 43 : Mobilité des personnes entre 2008 et 2010 (d'après données négaWatt, 2014)

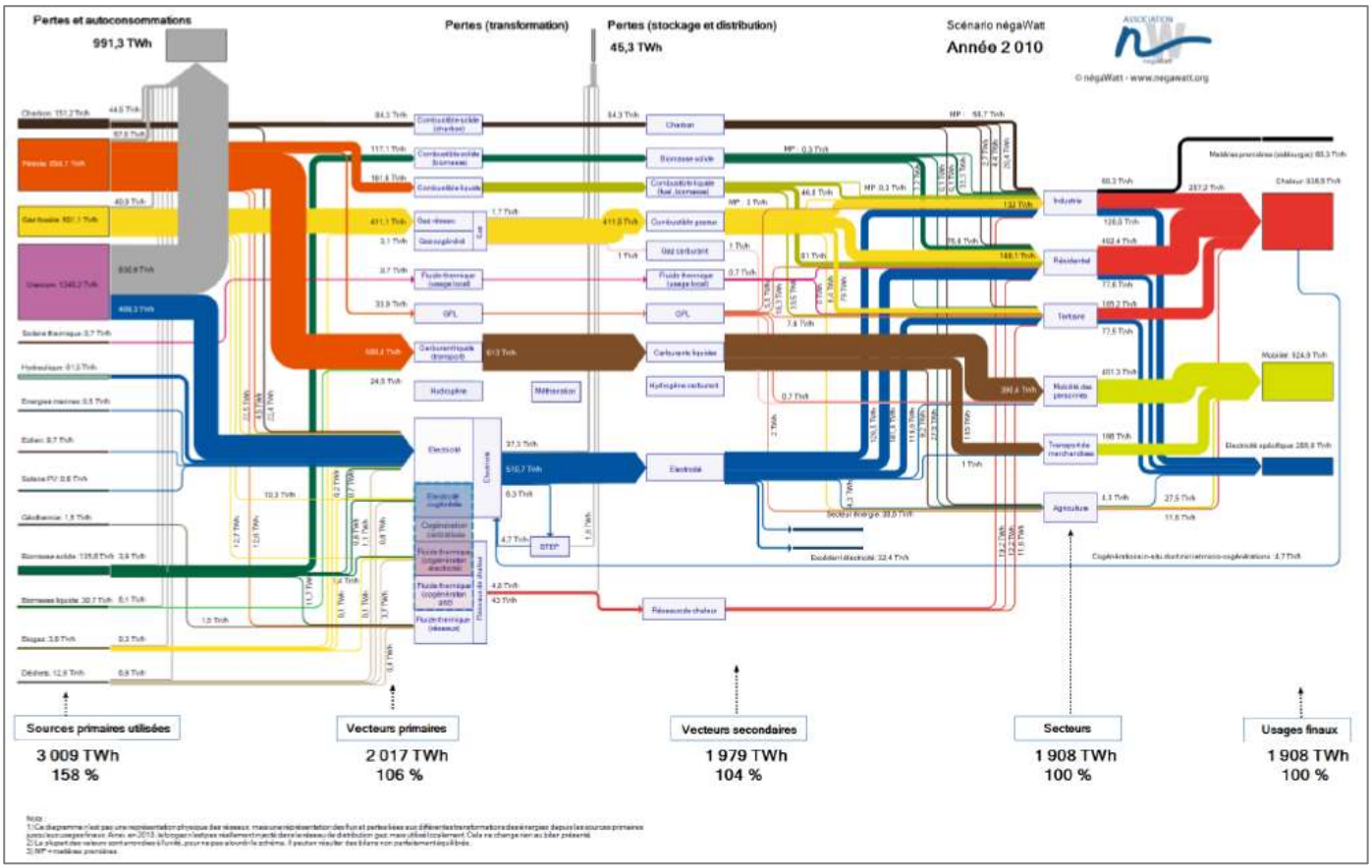


Figure 44 : Diagramme de Sankey pour la France, en 2010 (négaWatt, 2014)

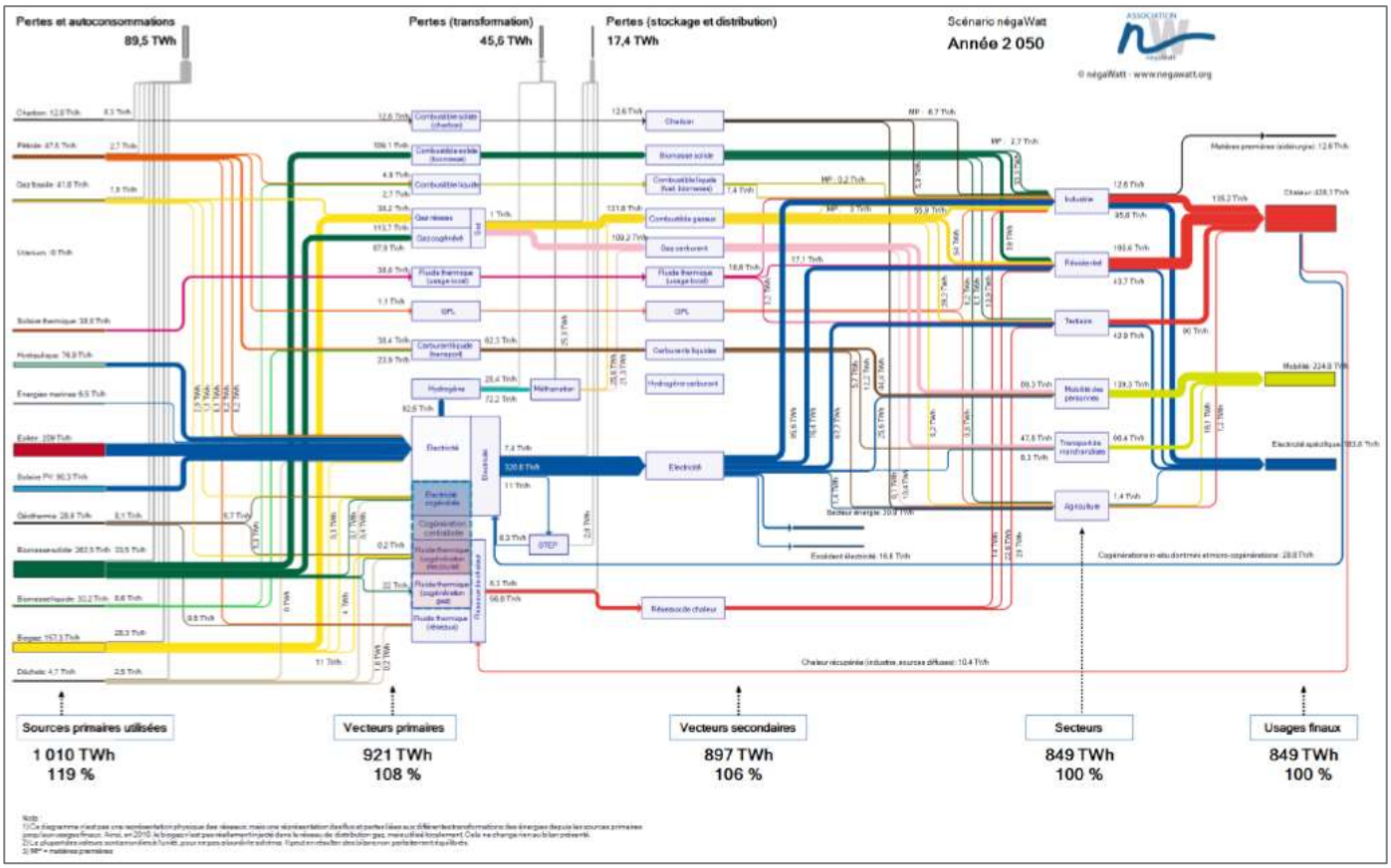


Figure 45 : Diagramme de Sankey pour la France, en 2050, dans le scénario négaWatt (négaWatt, 2014)

Consommations énergétiques

Les consommations énergétiques du scénario sont très détaillées dans le scénario, et il est possible d'avoir un panorama important de l'évolution des consommations dans les diagrammes de Sankey en 2010 et 2050 (Figure 44 et Figure 45). Ces diagrammes représentent les flux d'énergie depuis les sources primaires, en passant par les vecteurs énergétiques et la décomposition par secteurs (dont Mobilité des personnes et Transport de marchandises) pour en arriver aux usages finaux. Sans rentrer dans les détails de ces diagrammes, quelques remarques structurantes sur la comparaison entre 2010 et 2050 :

- ✓ La taille des flèches, représentant l'importance des flux énergétiques en jeu, diminue très fortement entre 2010 et 2050, depuis les sources utilisées jusqu'aux usages ;
- ✓ Les sources primaires utilisées basculent très fortement depuis les énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon) et fissiles (nucléaire/uranium) en haut à des sources d'origine renouvelables en bas du diagramme ;
- ✓ Le pétrole dans les transports passe d'un usage quasiment exclusif à une très faible part du mix énergétique, qui devient également plus diversifié.

Pour rentrer un peu plus dans les détails, la consommation énergétique des transports est environ divisée par 3, aussi bien pour le transport de voyageurs que de marchandises (Figure 46). C'est le résultat notamment de progrès sur la consommation unitaire des véhicules individuels (-56% grâce à l'hybridation des voitures, à la baisse de leur poids), sur le taux de remplissage moyen des voitures qui passe de 1,8 à 2,4, et des limitations de vitesse sur les routes. Ces consommations sont assurées à 57% par le vecteur gaz (dont 6% de gaz naturel et 51% de gaz d'origine renouvelable), suivi par les carburants liquides pour 27% (pétrole à 17% et biocarburants à 10%) et l'électricité pour 16%.

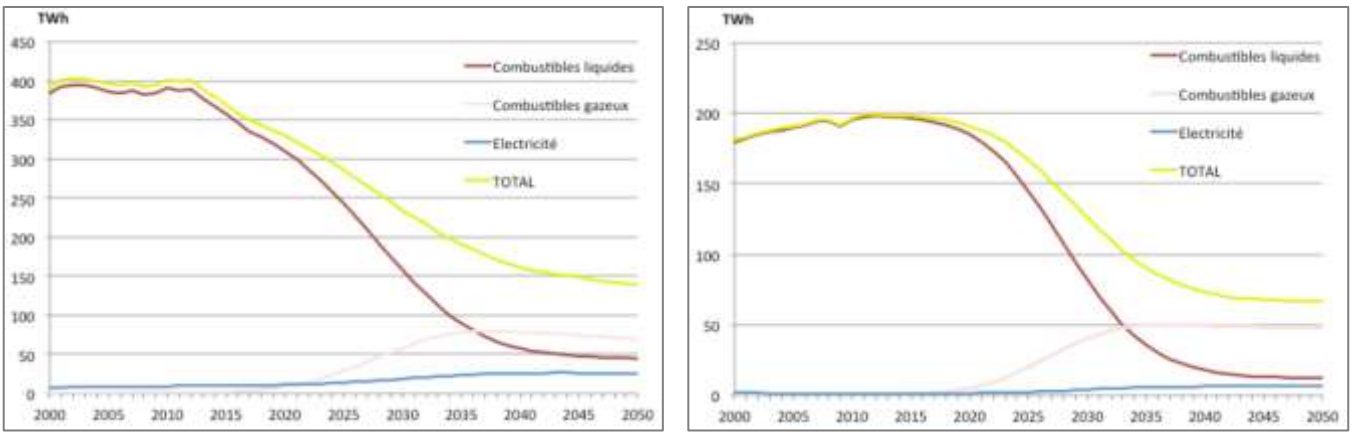


Figure 46 : Consommations énergétiques des transports de voyageurs (à gauche) et de marchandises (à droite) de 2000 à 2050

Facteur 4 et réduction des émissions

Le scénario permet d'atteindre le facteur 4 sur les émissions globales de gaz à effet de serre françaises, ce qui requiert selon négaWatt au minimum un facteur 6 à 7 sur les émissions liées à l'énergie, étant donné la difficulté à faire mieux qu'un facteur 2 dans l'agriculture et un facteur 3,5 dans le secteur industriel.

Avec un facteur 15 à la fois pour les émissions de CO_2 et pour le secteur des transports, les émissions globales de gaz à effet de serre atteignent un facteur 6, dépassant ainsi largement l'objectif du facteur 4.

ADEME 2012 : visions 2030 et 2050

Auteurs et contexte

L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) a mené durant l'année 2012 un exercice de prospective Vision 2030-2050, mobilisant ainsi ses services techniques et économiques pour proposer une vision d'un avenir énergétique plus durable. Les données utilisées sont principalement celles du document technique (ADEME, 2013c) qui diffèrent parfois du dossier de synthèse (ADEME 2012), et le document traitant de l'évaluation économique des visions énergétiques (ADEME, 2013a).

Périmètre

L'étude concerne l'ensemble des consommations énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre en France métropolitaine, avec 2010 comme point de départ et 2030 et 2050 comme horizons. Les consommations internationales (aérien international et soutes maritimes internationales) ne sont pas prises en compte.

Le modèle et les scénarios

Les méthodologies utilisées sont très différentes pour les 2 horizons, amenant à des trajectoires pas forcément continues entre les visions 2030 et 2050 :

- ✓ La vision 2030 correspond à un scénario exploratoire qui se veut à la fois ambitieux et réaliste. Cela correspond à une vision tendancielle volontariste ;
- ✓ La vision 2050 correspond à un exercice normatif, dans l'objectif d'identifier un chemin possible qui soit compatible avec l'objectif de Facteur 4 sur les émissions de gaz à effet de serre, en imaginant des changements plus structurants sur les modes de vie.

Le modèle utilisé (Med-Pro) est un outil technico-économique, et le scénario de transition énergétique a fait l'objet d'un bouclage macroéconomique avec le modèle ThreeMe développé par l'ADEME. C'est un modèle macroéconomique néokeynésien multisectoriel du type Offre globale – Demande globale, qui comporte 24 secteurs de production et 17 sous-secteurs énergétiques. Ce modèle permet notamment d'étudier l'effet des scénarios sur le PIB, l'emploi, la balance commerciale ou encore le pouvoir d'achat des ménages.

Les principaux déterminants des évolutions à 2050 concernant le secteur des transports et de la mobilité sont les suivantes :

- ✓ Mobilité totale constante par rapport à 2010, soit une diminution de 20% de la mobilité individuelle (télétravail, structure de la population, urbanisme…) ;
- ✓ L'usage du moyen de transport prend le dessus sur la possession, ce qui implique une forte réduction du parc de véhicules ;
- ✓ Report modal vers les transports en commun et les modes actifs ;
- ✓ Passage du pétrole aux véhicules à gaz (dont la moitié renouvelable), véhicules électriques et biocarburants ;
- ✓ Importants efforts logistiques sur le transport de marchandises, ce qui permet de retourner au niveau de 2010 en Mds t-km transportées.

Principaux résultats et enseignements

Parts modales

L'impact des reports modaux dans les territoires urbains, périurbains et pour les déplacements longue distance est illustré dans la Figure 47.

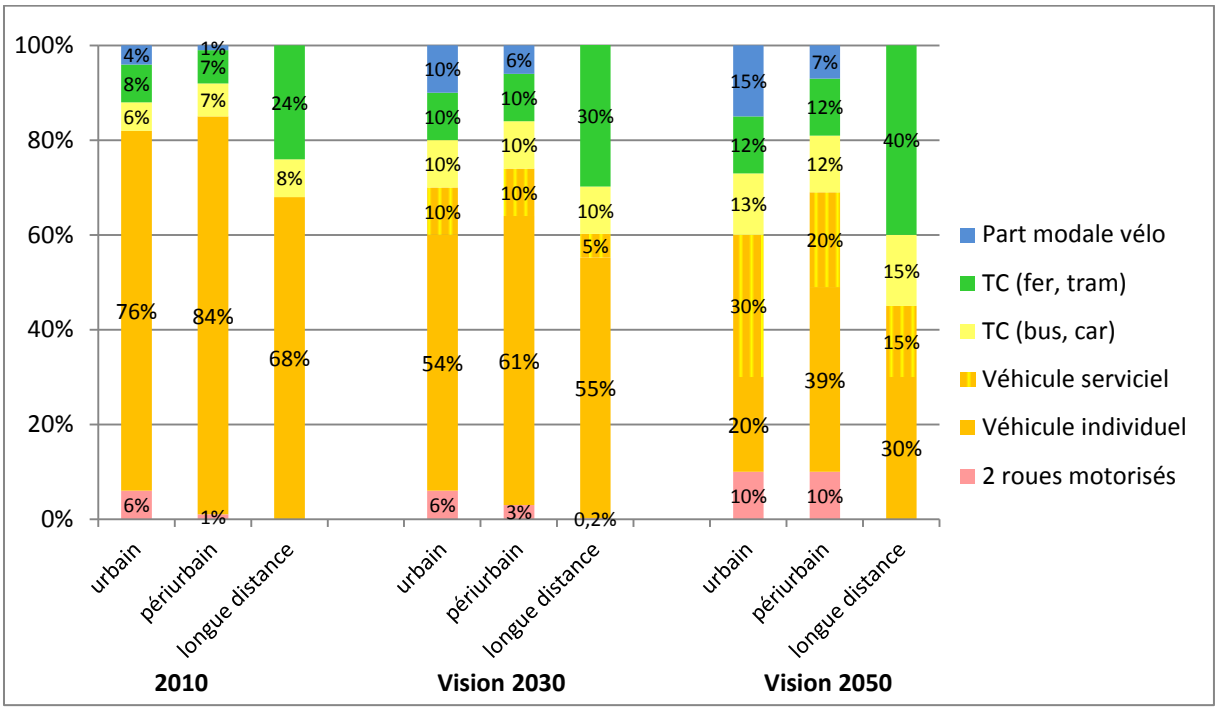


Figure 47 : Répartition des flux de voyageurs dans les territoires urbains, périurbains et en longue distance (d'après données ADEME, 2013c)

Consommations énergétiques

Etant donné les hypothèses d'efficacité énergétique et de report modal notamment, les consommations énergétiques dans les transports sont divisées par 3 entre 2010 et 2050. Le mix énergétique passe du pétrole essentiellement aux énergies renouvelables (biogaz, biocarburants) et à l'électricité (Figure 48).

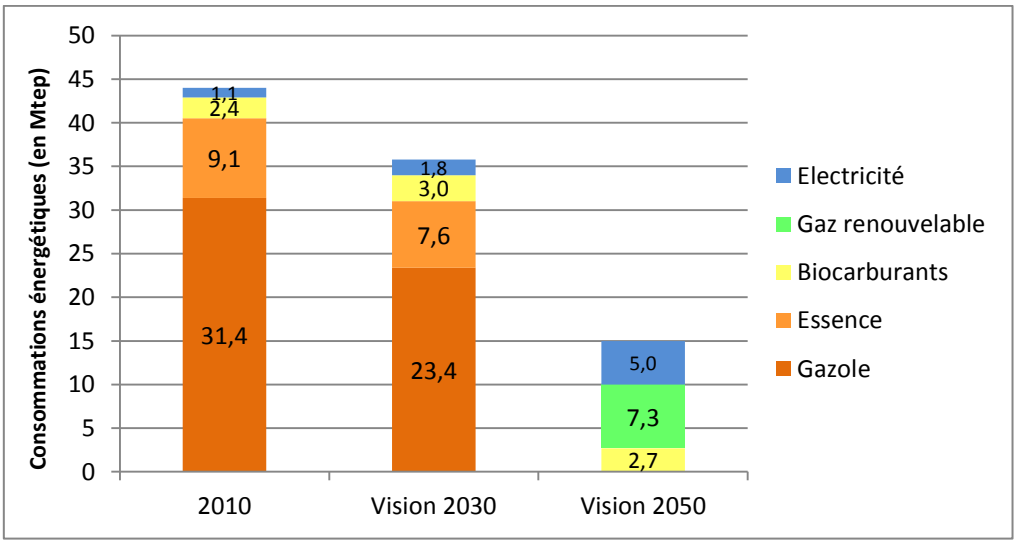


Figure 48 : Consommations énergétiques des transports par source (sur données ADEME, 2013c et ADEME, 2012 pour répartition essence/diésel)

Facteur 4 et réduction des émissions

Les scénarios à 2030 et 2050 ayant des approches différentes (exploratoire et normative), la trajectoire sur les émissions n'est pas forcément cohérente ou du moins continue. Au niveau des émissions globales et en prenant 1990 comme référence, les chiffres du rapport technique donnent une diminution de 41% des émissions de gaz à effet de serre en 2030 et de 75,2% en 2050, objectif fixé par ce scénario normatif.

Les secteurs énergétiques participent bien plus fortement à l'effort de réduction, pour tenir compte des difficultés plus importantes à décarboner les secteurs de l'agriculture ou de l'industrie. Ainsi le secteur des transports réalise une baisse de 92,6% entre 1990 et 2050 (113,3 $MtCO_2$ à 8,4 Mt), soit un facteur 13,5, alors que la baisse entre 1990 et 2030 est de 13,7% seulement, reflétant la difficulté de décarboner ce secteur à court et moyen terme.

Ainsi cette rupture entre 2030 et 2050 supposerait un rythme de diminution des émissions des transports de l'ordre de -11,5% par an. Les changements structurels les plus importants pour atteindre ces objectifs sont liés au report modal vers l'autopartage, le transport collectif et les modes doux, ainsi que la pénétration des véhicules électriques et hybrides rechargeables (ADEME, 2012).

Impacts macroéconomiques

Les visions énergétiques ont également fait l'objet d'une évaluation macroéconomique à l'aide du modèle ThreeME (ADEME, 2013a). Un scénario de référence est comparé avec les scénarios des visions énergétiques, en introduisant des mesures ou des changements exogènes.

Les estimations de la modélisation indiquent que les effets expansionnistes de la transition énergétique l'emportent sur ses effets récessifs. Dans le scénario médian, ce sont ainsi 825 000 emplois supplémentaires en 2050 et 3 points de PIB de plus que dans le scénario de référence. L'augmentation dans un premier temps du prix de l'énergie serait plus que compensé à long terme par la baisse de la demande d'énergie. Le revenu disponible brut des ménages augmente de 4% de plus que dans le scénario de référence, les créations nettes d'emplois permettent de réduire le chômage, et la transition énergétique génère également des effets positifs sur le commerce extérieur et les finances publiques.

L'ADEME indique que les résultats de cette modélisation sont « relativement robustes », étant donné qu'ils sont peu sensibles à des modifications de paramètres essentiels du modèle que sont les élasticités de substitution ou les élasticités prix de la demande.

ANCRE 2013 : scénarios pour la transition énergétique

Auteurs et contexte

L'ANCRE est l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie, et regroupe des organismes publics de recherche du domaine. Elle a souhaité contribué au débat national sur la transition énergétique par la réalisation de 3 scénarios sortis en 2013 (ANCRE, 2013 ; ANCRE, 2014), et dont les principaux résultats concernant les transports sont détaillés dans cette fiche.

Périmètre

Les scénarios ont pour objectif d'atteindre le facteur 4 sur les émissions de CO_2 liées à l'énergie en France, via des actions à la fois sur la demande d'énergie et sur l'offre (en prenant notamment l'hypothèse « nucléaire 50% » en 2025), afin de proposer une vision plus fine des possibilités technologiques d'ici 2050.

Le modèle et les scénarios

Le modèle se base essentiellement sur des travaux portant sur les critères technologiques et scientifiques.

Les scénarios présentent un jeu d'hypothèses communes (population, croissance, prix de l'énergie…) et une approche volontariste de la transition énergétique plus ou moins en rupture avec les évolutions tendancielles. Ils se différencient dans les 3 approches suivantes :

- ✓ Sobriété renforcée (SOB), reposant sur le tryptique mis en avant par négaWatt de sobriété renforcée, efficacité énergétique et développement des énergies renouvelables ;
- ✓ Décarbonisation par l'électricité (ELE), se rapprochant ici de la logique du scénario Négatep, où le rôle central de l'électricité renouvelable et nucléaire est mis en avant ;
- ✓ Vecteurs diversifiés (DIV), où l'accent est mis sur le développement de nouveaux vecteurs énergétiques, comme la valorisation des sources de chaleur fatale et les bio-énergies.

Bien que les résultats ne soient pas détaillés ici, une évaluation multi-critères des scénarios sur des indicateurs économiques, environnementaux, politiques et stratégiques est réalisée dans le rapport de l'étude.

Principaux résultats

Parts modales

Les principales différences entre les scénarios concernant l'organisation du secteur des transports portent sur :

- ✓ L'évolution de la demande de mobilité : elle est constante pour la mobilité voyageur dans le scénario SOB, ce qui implique une baisse de 20% de la mobilité individuelle (télétravail, transports doux, livraisons à domicile), alors qu'elle augmente de 25% essentiellement sous l'effet de la croissance démographique pour les scénarios ELE et DIV ; concernant le trafic de marchandises, il augmente légèrement pour le scénario SOB et il augmente de 53% pour ELE et DIV ;

- ✓ La part relative des différents modes de transport : elle reste équivalente à 2010 pour ELE et DIV, et se modifie fortement pour le scénario SOB qui voit la part de la voiture diminuer de 82% à 50% au profit des transports ferrés (23%), des bus et taxis (14%) et des deux-roues (13%) ; Côté marchandises, seul le scénario SOB voit un changement majeur avec le triplement du fret ferroviaire, qui représente ainsi 25% du fret en 2050 avec ses 90 Gtkm transportés (Figure 49).

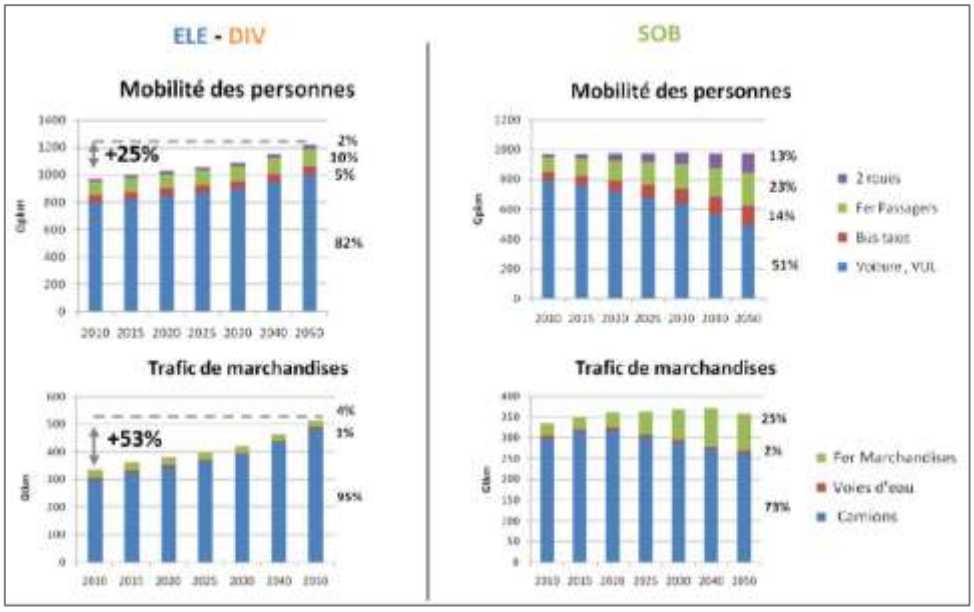


Figure 49 : Evolution de la demande de mobilité selon les scénarios (ANCRE, 2014)

- ✓ Les technologies et vecteurs énergétiques privilégiés : le défi technologique est important dans tous les scénarios, et il se repose en grande partie sur une réduction de la consommation unitaire des voitures de 50% (ELE et SOB) à 55% (DIV), et d'une pénétration plus ou moins importante des vecteurs et carburants alternatifs : l'utilisation des carburants fossiles est divisée par 3 à 5 selon les scénarios pour être substituée par la biomasse (50% dans DIV), le gaz, les véhicules électrifiés (plus d'un quart de l'énergie des transports dans ELE, où 45 % du parc de voitures est électrique ou hybride rechargeable) ou l'hydrogène (Figure 50).

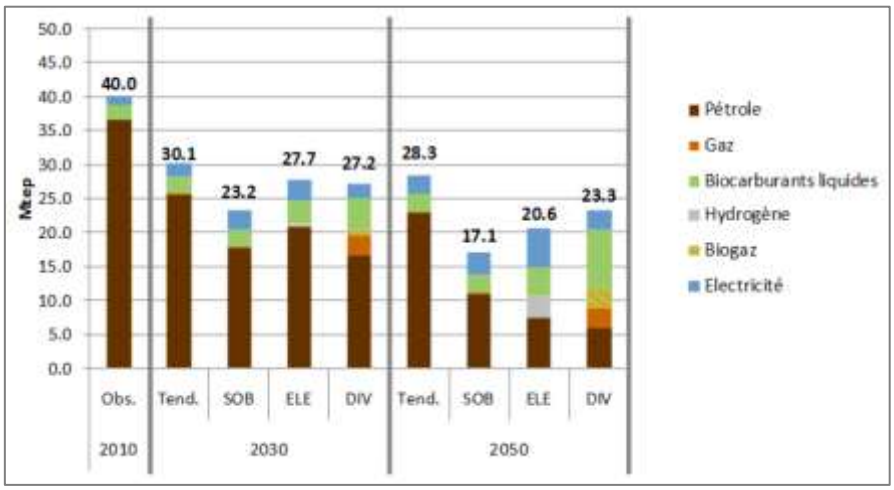


Figure 50 : Consommation des transports par énergie dans les différents scénarios (ANCRE, 2014)

Facteur 4 et réduction des émissions

Seulement l'évolution des émissions liées au transport routier sont donnée, et elles baissent de 70% dans le scénario SOB, et de 78% dans les scénarios ELE et DIV, mettant ainsi en avant la nécessité de diminuer les consommations d'énergie du secteur (particulièrement marquée pour SOB), mais aussi d'utiliser des énergies décarbonées, ce qui est mieux réussi dans les scénarios ELE et DIV.

Au niveau de l'ensemble des émissions de CO_2 liées à l'énergie, le facteur 4 est atteint pour tous les scénarios, avec néanmoins la nécessité de faire appel à des technologies de rupture. Mais en intégrant les autres secteurs et gaz à effet de serre, la réduction n'est que de 65 à 70%. Les scénarios permettent aussi de diminuer la dépendance énergétique de la France de 51% en 2010 à 27-36% selon les scénarios, en fonction de la substitution des énergies fossiles importées par d'autres sources d'énergies.

Enseignements pour les politiques publiques

L'étude expose un certain nombre de résultats sur une grande variété de critères. Les conclusions de l'étude s'accompagnent aussi d'un panorama sur les technologies de la transition énergétique, et de propositions pour la loi en cours de discussion au moment de l'étude :

- ✓ Bien que l'atteinte du facteur 4 est possible, l'ANCRE insiste sur les efforts importants qui seront néanmoins nécessaires pour l'atteindre, en particulier concernant les comportements, la prise en compte du rapport coût-performance des technologies mobilisées, et sur le développement d'infrastructures et d'aménagements ;
- ✓ Elle insiste également sur le besoin de coordination des politiques et de la R&D au niveau européen, et de la coordination au niveau mondial sur le prix du carbone et le déploiement des technologies clés de la transition énergétique ;
- ✓ En matière de R&D, les efforts doivent notamment porter sur la maîtrise de la demande, sur les filières d'énergies renouvelables, l'interconnexion du réseau et le stockage de l'énergie, ou encore le stockage et la valorisation du CO_2 ;
- ✓ Il apparait également nécessaire de mettre en place un processus de révision récurrent à la fois des orientations de la transition énergétique, et de la R&D qui y est associée, de façon à tenir compte des évolutions technologiques ;
- ✓ L'évaluation des investissements nécessaires pour les différents scénarios mène à un chiffre d'environ 1000 milliards d'euros pour tous les scénarios ;
- ✓ Au vu de la complexité du sujet, l'ANCRE fait le diagnostic d'un manque d'outils d'analyse et d'évaluation partagés concernant les impacts macroéconomiques, sur l'emploi ou l'environnement de ces scénarios de transition énergétique ;
- ✓ Enfin, les grandes orientations contrastées proposées par les 3 scénarios révèlent aussi différents leviers d'actions qu'il est possible de combiner dans une certaine mesure : agir sur les modes de vie (SOB), via la mise en place de nouvelles infrastructures (ELE), ou encore par un soutien à la structuration de différentes filières technologiques (DIV).

GrDF 2013 : scénario facteur 4

Auteurs et contexte

En tant qu'exploitant du réseau de distribution de gaz en France, GrDF s'est interrogé sur le rôle que ce réseau pouvait jouer dans la politique énergétique française. Il s'est appuyé sur des compétences externes pour certaines hypothèses, notamment sur les scénarios de l'ADEME ou RTE pour l'électricité. Par ailleurs, il est précisé que le scénario est « publié à titre d'illustration et ne saurait constituer un positionnement de GrDF sur des thématiques hors du champ du gaz en distribution » (GrDF, 2013a).

Périmètre

Le scénario concerne l'ensemble des émissions françaises de CO_2, en incluant uniquement les vols intérieurs pour le transport de voyageurs. Le scénario prend comme année de référence 2010 et se projette à l'horizon 2050.

Le modèle

Le modèle interne utilisé est un outil de prospective bottom-up multi-énergies et multi-secteurs. Il rend compte des évolutions du paysage énergétique à partir de l'évolution démographique et économique, de la sobriété et de l'efficacité énergétique, et enfin de la conversion entre les énergies.

Cependant, les hypothèses ainsi que le fonctionnement du modèle ne sont pas détaillés dans les publications consultées (GrDF, 2013a ; GrDF, 2013b).

Le scénario

Un seul scénario est projeté à horizon 2050, avec une vision « d'optimisation locale multi-énergies grâce à la complémentarité des réseaux » (GrDF, 2013a). Ainsi, l'objectif du scénario est d'atteindre le facteur 4, grâce à un mix de solutions à la fois côté usage (sobriété et efficacité) et côté production (via une forte pénétration des énergies renouvelables).

Principaux résultats

Parts modales

A horizon 2050, la demande de transport de voyageurs est en baisse de 14% par rapport à 2010. Les transports en commun augmentent de 60% en v-km et les modes non motorisés sont multipliés par 7, au détriment de la voiture particulière (-45%) et de l'avion (-33%). Ces deux modes plus émetteurs représentent 60% des v-km en 2050, contre 81% en 2010.

Le transport de marchandises décroit pour sa part de 8%. Le fret ferroviaire et le fret fluvial se développent de manière à réduire la part du transport routier, qui passe de 88% des t-km à 63% de 2010 à 2050.

Facteur 4 et réduction des émissions

Le facteur 4 est atteint en 2050 pour les émissions de CO_2, à la fois pour le secteur des transports et tous secteurs confondus (par rapport aux valeurs de 2010). Pour les transports, la

moitié du chemin est réalisée par une baisse des consommations énergétiques, permise notamment par les modes de transport partagés (covoiturage et transports en commun). La deuxième moitié est possible par la diversification énergétique des carburants, notamment d'origine renouvelables. Ainsi le mix énergétique en 2050 n'est plus composé qu'à 45 % de carburants liquides qui subissent une forte baisse parmi les vecteurs énergétiques (Figure 51), alors que la mobilité électrique se développe à hauteur de 13%, et les réseaux de gaz à 42%.

Les réseaux de gaz ne sont plus alimentés qu'à 29% par du gaz naturel fossile, le reste étant issu d'énergies renouvelables (Figure 52) entre du biométhane issu de la gazéification (35%), de la méthanisation (23%), de micro-algues (8%), ou de l'hydrogène issu des surplus d'électricité renouvelable (5%).

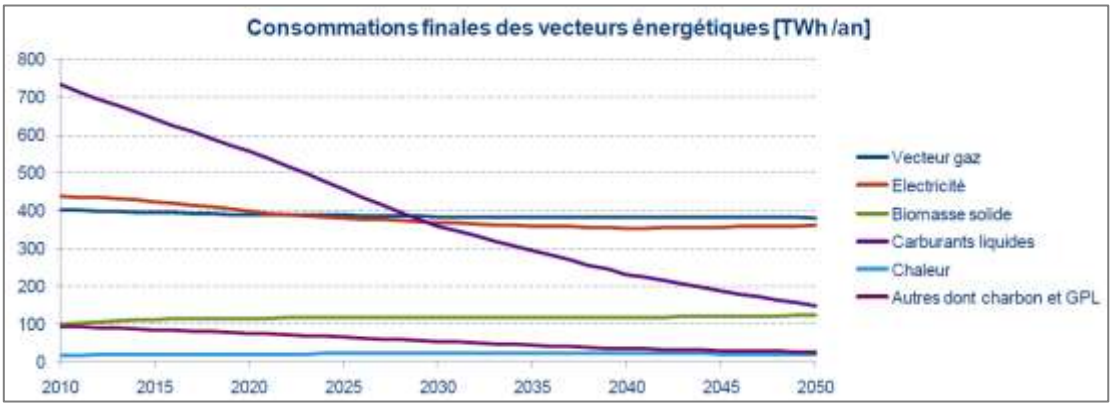


Figure 51 : Consommations finales des vecteurs énergétiques en 2050, tous secteurs confondus (GrDF, 2013a)

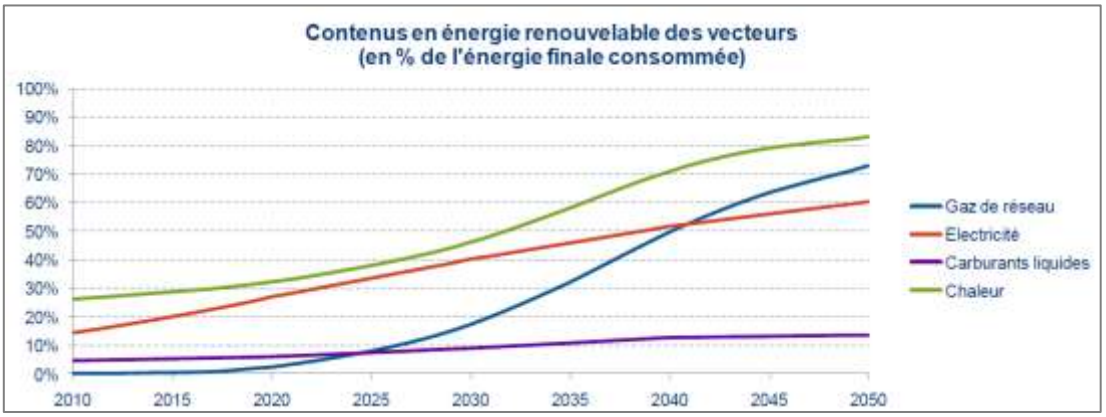


Figure 52 : Contenus en énergie renouvelable des vecteurs en 2050, tous secteurs confondus (GrDF, 2013a)

Enseignements du scénario

Bien que les hypothèses soient assez peu détaillées, ce scénario nous renseigne sur la portée que peuvent prendre les motorisations gaz à horizon 2050 si le choix politique de développer ce type de carburant était réalisé. Les résultats trouvés en termes de mix énergétique sont finalement assez proches du scénario négaWatt et de la vision ADEME, où les environ 50% des transports étaient assurés par du gaz d'origine renouvelable.

Il est cependant permis de douter de la réalisation d'un tel scénario sans une impulsion politique majeure et rapide concernant à la fois les infrastructures de distribution, les aides à l'achet des véhicules ou le développement de la production de gaz renouvelable.

Greenpeace 2013 : scénario de transition énergétique

Auteurs, contexte et périmètre

L'association Greenpeace construit depuis 2005 des scénarios de prospective sur la transition énergétique. Le scénario de 2013 réalisé à l'échelle de la France, correspond à une prospective sur les émissions de CO_2 liées à l'énergie pour tous les secteurs, de 2009 à 2050. L'objectif affiché de ce scénario est double (Greenpeace, 2013) :

- ✓ Réduire au plus près de zéro les émissions de gaz à effet de serre en France ;
- ✓ Assurer la sortie du nucléaire.

Le modèle et les scénarios

Deux scénarios sont comparés :

- ✓ Un scénario de référence AMS-Mesure 2011, créé par Enerdata et la DGEC ;
- ✓ Et le scénario de transition énergétique commandé par Greenpeace[1], qui fonctionne sur la logique du scénario négaWatt de « sobriété, efficacité et renouvelable ».

Principaux résultats et enseignements

Consommations énergétiques

Concernant les transports, trois leviers sont utilisés pour réduire les consommations énergétiques et les émissions de CO_2 : le report modal vers les moyens de transport les plus efficaces ; la réduction de la consommation et des émissions de chaque mode de transport ; et la réduction des kilomètres parcourus par passager.

Les parts modales ne sont pas détaillées mais les consommations d'énergie finale le sont, et elles ont décru de 59 % dans les transports entre 2009 et 2050. Le choix a été fait de profiter des économies d'électricité de 30 % dans les secteurs du résidentiel, des services et de l'industrie, pour développer la mobilité électrique (Figure 53). L'électricité représente en effet 58 % de la consommation d'énergie finale dans les transports en 2050, suivie par les agrocarburants et le biogaz (22 %), les énergies fossiles (14 %) et l'hydrogène (6 %).

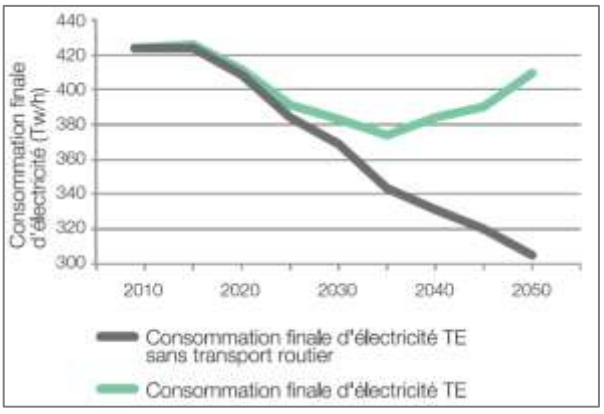


Figure 53 : Part de la consommation finale d'électricité pour les transports dans le scénario de transition énergétique (Greenpeace, 2013)

L'électricité est fournie à 98 % par des sources renouvelables, avec plus de 50 % par l'éolien (276 TWh), suivi par l'hydroélectricité, la biomasse/biogaz et le solaire photovoltaïque à un peu plus de 10 % chacun.

Facteur 4 et réduction des émissions

Le scénario permet de très fortes réductions des émissions de CO_2, puisqu'un facteur 18,5 est atteint pour les émissions globales entre 1990 et 2050 (-94,6%), loin du scénario de référence (-47%) et du facteur 4 (-75%). De même, les émissions des transports sont divisées par un facteur 16 entre 2009 et 2050.

[1] Le scénario a été commandé à l'Institut des techniques thermodynamiques du Centre aérospatial allemand DLR. L'offre énergétique est simulée par le modèle MESAP/PlaNet adopté par les scénarios de Greenpeace.

CIRED-RAC 2012 : scénario bas carbone « acceptable »

Auteurs, contexte et périmètre

L'étude du CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement) et du RAC (Réseau Action Climat) présente les résultats pour la France du projet de recherche européen ENCI-LowCarb (ENgaging Civil society in Low Carbon scenarios). L'étude concerne l'ensemble des émissions françaises de gaz à effet de serre, entre 2010 et 2050. Seules les émissions nationales de l'aviation sont prises en compte dans les transports (CIRED-RAC, 2012).

La méthodologie de conception du scénario

L'objectif et l'originalité de l'étude consiste à développer une méthodologie garantissant l'intégration transparente des contributions de « parties prenantes » dans le processus d'élaboration des scénarios, afin d'améliorer l'acceptabilité des trajectoires bas-carbone. La méthodologie porte donc sur la traduction de ces contributions en hypothèses exploitables pour la modélisation.

Cet objectif repose notamment sur le constat de la nécessaire implication des parties prenantes dans l'élaboration de scénarios énergétiques, que ce soit pour bénéficier de leur expertise technique, mettre en lumière les clivages et obstacles, faire émerger les éléments de consensus sur les solutions, ou encore favorise l'appropriation du scénario par les acteurs. L'implication dès la construction du scénario, et notamment dans la construction des paramètres et variables d'entrée, nécessite une double imprégnation culturelle entre les parties prenantes et le modélisateur.

Les 2 grands principes qui ont guidé le travail de modélisation sont :

- ✓ L'acceptabilité des parties prenantes, entendue comme les mesures politiques jugées acceptables par au moins la moitié des parties prenantes ;
- ✓ Le réalisme, par la prise en compte des contraintes techniques et économiques.

La démarche de conception des scénarios collaboratifs s'est réalisée en 5 étapes :

1. Ateliers d'experts ;
2. Identification et choix des parties prenantes nationales, selon une grille « influence-intérêt » ;
3. Ateliers sectoriels avec les parties prenantes sur l'acceptabilité ;
4. Traduction des contributions des parties prenantes dans le paramétrage du modèle : les points de désaccords non tranchés ont donné lieu au développement de plusieurs variantes de scénario ;
5. Séminaire transversal intersectoriel : interactions et arbitrages intersectoriels et partage des réductions entre secteurs abordés.

Le modèle

L'outil de modélisation Imaclim-R France a été utilisé pour la modélisation. C'est un modèle d'équilibre général, hybride dans le sens où il à la fois les dynamiques et contraintes économiques et technologiques y sont représentées.

Concernant la représentation du secteur des transports dans le modèle Imaclim-R, les hypothèses principales sont les suivantes :

- ✓ Deux types de transport y sont représentés du point de vue des circuits économiques : les transports pour compte propre et les transports pour le compte d'autrui ;
- ✓ La « contrainte de budget-temps » plafonne la durée quotidienne consacrée aux transports (loi de Zahavi) ;
- ✓ L'évolution du taux de motorisation est liée au revenu et à la densité urbaine ;
- ✓ L'efficacité énergétique du parc d'automobiles individuelles dépend du choix de consommation des ménages et du progrès technique ;
- ✓ L'évolution des prix de l'énergie est intégrée au prix des services de transport ;
- ✓ La demande de transport de marchandises correspond à la somme des demandes de fret de chaque secteur productif ;
- ✓ Le modèle donne l'évolution des infrastructures de transport au moyen de décisions d'investissement publics et privés.

Les mesures acceptables du scénario

Dans le secteur des transports, les mesures jugées acceptables (par au moins la moitié des parties prenantes) sont résumées dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Mesures politiques acceptables dans les transports pour le scénario bas-carbone « acceptable » (CIRED-RAC, 2012)

Secteur des transports	**Urbanisme.** Les incitations économiques et la réglementation limitent la croissance de l'étalement urbain jusqu'en 2030. Au-delà, la densité urbaine repart à la hausse.
	Programme d'investissements dans les transports urbains. Le montant de ces programmes, qui se traduisent notamment par la mise en service de nouveaux bus et tramways, double à partir de 2012 pour une période de 15 ans.
	Télétravail. Il est estimé à un jour ouvré sur dix.
	Taux d'occupation des automobiles. Les incitations font passer le taux d'occupation des voitures en milieu urbain de 1,25 à 1,5.
	Taxe sur le kérosène. À partir de 2012, la consommation de kérosène pour le transport aérien est soumise à une taxation, dont le montant est fixé à 400€/tep.
	Taxe écologique sur les poids lourds. Cette écotaxe frappant la consommation de carburant liquide des poids lourds entre en vigueur en 2012. Ses recettes devraient rapporter 1,2 milliard d'€ au cours de l'année 2012.
	Programme d'investissements ferroviaires. Les investissements dans les infrastructures routières se limitent au seul entretien des infrastructures. Les flux financiers à destination du transport routier sont réorientés vers le transport ferroviaire pendant 20 ans.
	Tous les **investissements supplémentaires réalisés dans les transports en commun** proviennent d'une réaffectation partielle des **investissements initialement consacrés aux infrastructures routières.**
	Bonus-malus. Cette mesure, prolongée jusqu'en 2050, garantit chaque année l'équilibre financier du dispositif gouvernemental.
	Logistique. L'amélioration de la chaîne d'approvisionnement s'accompagne d'un découplage annuels des besoins de transport de marchandises égal à 1% dans tous les secteurs.
	Infrastructures. La part du mode de transport de marchandises par voie ferrée n'atteint que 20% en 2030 (hypothèse exogène).

Principaux résultats et enseignements

Parts modales et consommations énergétiques

La mobilité des voyageurs augmente de 19% au total, soit une augmentation par personne de 3% entre 2010 et 2050. Les parts modales restent à peu près inchangées.

La consommation d'énergie finale des transports baisse de 41%. Les technologies déployées concernent essentiellement les agrocarburants (qui représentent 39% des produits raffinés en 2050), les véhicules hybrides à prolongateur d'autonomie (qui entament une percée massive après 2030) et les véhicules électriques (5% du parc en 2050).

Facteur 4 et réduction des émissions

Au niveau global, le scénario bas-carbone « acceptable » ne permet pas d'atteindre le facteur 4 ni sur les émissions françaises de CO_2 seules (-68% par rapport à 1990) ni sur les émissions tous gaz à effet de serre (-46%). Les réductions d'émissions sont encore plus faibles quand on tient compte de l'approche empreinte (émissions engendrées par les consommations des Français), où la baisse des émissions de GES n'est plus que de 29%.

Regardées à la lumière de l'identité de Kaya (ci-dessous), la décomposition des émissions de CO_2 montre que la variation totale de -68% des émissions cumule les effets suivants (avec EF énergie finale et EP énergie primaire) :

$$CO_2 = POP \times \frac{PIB}{POP} \times \frac{EF}{PIB} \times \frac{EP}{EF} \times \frac{CO2}{EP}$$

+15 % POP ; +41 % PIB/POP ; -51 % EF/PIB ; -18 % EP/EF ; -38 % CO_2/EP

Dans le secteur des transports, les émissions de CO_2 baissent de 60 % par rapport à 2010, avec une réduction à nouveau plus marquée pour le transport de personnes (-66 %) que pour le fret (-40%).

Enseignements pour les politiques publiques

L'évaluation économique montre que l'impact économique global des mesures est positif, sauf à court terme et jusqu'en 2017, en raison de l'instauration de la taxe carbone en 2012. Comme d'autres modèles ont pu le mettre en avant, les impacts sont également positifs sur les dépenses d'énergie en raison des progrès réalisés, diminuant ainsi la dépendance aux importations et la facture énergétique française.

Des investissements lours sont nécessaires pour certaines mesures. Dans le secteur des transports, les mesures fiscales exercent un effet positif sur les finances de l'Etat, execpté les recettes de la taxe intérieure de consommation de produits pétroliers, qui enregistre un déclin due aux baisses des consommations. Les investissements d'infrastructures se font pour leur part à périmètre constant, avec un report depuis les infrastructures routières vers les transports urbains et ferroviaire (Tableau 10).

Tableau 10 : Coûts des investissements et des politiques dans le secteur des transports (CIRED-RAC, 2012)

	2010	2020	2030	2040	2050
Mesures fiscales (en milliards d'€)					
Écoredevance poids lourds	0	1,3	1,1	1,1	1,2
Taxe sur le kérosène	0	1,6	1,1	1,4	1,3
Effet sur le produit de la taxe intérieure de consommation sur les produits pétroliers	23,8	21,4	17,9	13,4	12,9
Taxe carbone	0	0	13,7	18,1	34,8
Investissements en infrastructures					
Transports urbains	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				
Transport ferroviaire	+3 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				
Transport routier	-6 milliards d'€ par an entre 2012 et 2030				

Ce scénario « acceptable » ne permet pas d'atteindre le facteur 4. Cependant, l'étude identifie deux mesures additionnelles, mais qui sont jugées acceptables par un peu moins de la moitié des parties prenantes, qui permettent d'atteindre le facteur 4 sur les émissions de CO_2 :

- ✓ Une taxe carbone-énergie (TCE) afin d'encourager la baisse de la consommation d'énergie ;
- ✓ Une obligation de rénovation au parc immobilier existant.

Il est également noté que le prix des énergies fossiles joue un rôle central dans ces modélisations, d'où l'importance d'une taxe carbone. Outre cela, le mode de développement emprunté jour un rôle majeur, à savoir dématérialisation de l'économie via l'évolution des modes de consommation, ou la relocalisation des capacités de production en France, qui ont des impacts différents sur le niveau d'activité et les émissions de CO_2.

Enfin, il est indiqué que les travaux montrent aussi la difficulté de l'obtention d'un consensus sur l'acceptabilité de mesures ambitieuses entre les parties prenantes, surtout si leur activité s'en ressent directement. Cependant, l'étude ne détaille pas les points de clivage importants, de même que la traduction des contributions en hypothèses n'est pas détaillée. La démarche reste néanmoins très intéressante et constitue sûrement un des travaux les plus aboutis sur l'élaboration participative d'un scénario de transition énergétique.

Enerdata – LET, 2008 : les scénarios de mobilité durable du PREDIT

Auteurs et contexte

Les scénarios ont été développés par Enerdata et le Laboratoire d'Économie des Transports, par un programme commandité en 2004 par le PREDIT (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres ; CGDD, 2013b). Les résultats ont été présentés dans de nombreux articles, notamment par Y. Crozet et H. G. Lopez-Ruiz. Certains résultats diffèrent légèrement d'une publication à l'autre, ceux retenus ici proviennent principalement du papier du LET&Enertada, 2008.

Périmètre

L'étude concerne des scénarios de trafics passagers et marchandises et leurs émissions de CO_2 associées entre 2000 et 2050, à l'échelle de la France. Le transport aérien international semble être inclus également dans le périmètre, au vu des chiffres de l'aviation.

Le modèle

Le modèle utilisé est le modèle démo-économique TILT (Transport Issues in the Long Term), qui traite des relations entre la croissance économique, technologies, mobilité et émissions de CO_2 (Lopez-Ruiz, 2008). Différents modules le composent de manière à faire le lien entre ces différentes composantes : « Transports et infrastructures », « Micro-comportements », « Effets et quantification des politiques publiques » et le module « Emissions ».

Une particularité du mode de construction des scénarios est d'accorder une place importante aux hypothèses concernant les vitesses de transport et donc aux budgets-temps de transport. Historiquement, l'augmentation des vitesses de transport a permis de se déplacer toujours plus loin pour un budget-temps constant (loi de Zahavi), ces tendances sont levées dans les 2 scénarios alternatifs et constituent des éléments structurants de la réflexion.

Les scénarios

En prenant comme année de base l'année 2000, 3 scénarios ont été projetés dans une logique de backcasting sur le facteur 4 :

- ✓ Le scénario « Pégase », qui se rapproche d'un scénario tendanciel concernant la mobilité et les émissions de CO_2. Les principaux gains d'émissions réalisés dans ces scénarios reposent sur les progrès techniques, accompagnés par la réglementation environnementale et le développement de nouvelles infrastructures de transport. Ce scénario ne permettant pas d'atteindre le facteur 4 malgré des hypothèses jugées optimistes mais réalistes, deux autres scénarios sont considérés ;
- ✓ Le scénario « Chronos », où une contrainte réglementaire sur la vitesse est conjuguée à un renchérissement du coût des transports. La baisse de 20% des vitesses sur route se traduit par une hausse de 20% du budget-temps de transport, ainsi la variable du temps devient la ressource rare. L'acceptabilité de cette transition repose ainsi sur un fort développement des infrastructures de transport qui vise à favoriser la multimodalité verte, et dans une moindre mesure sur la nécessité d'une hausse de l'utilité du temps de transport.

- ✓ Enfin, le scénario « Hestia » considère une redécouverte, contrainte ou choisie, de la proximité. En effet, des mécanismes de quotas et de permis négociables imposent aux ménages et aux entreprises de nouveaux arbitrages dans leurs choix de localisation. Cela entraine des changements radicaux dans l'organisation de la production, de la consommation et des modes de vie, dans le sens d'une diminution des distances parcourues.

Principaux résultats

Parts modales

L'ensemble des scénarios voient une progression des trafics à horizon 2050 (Figure 54), qui est plus marquée pour le transport de marchandises (+61 % pour Pégase et Chronos et +21 % pour Hestia) que pour le transport de voyageurs (+42 % pour Pégase, +35 % pour Chronos et +13% pour Hestia). La croissance est particulièrement marquée pour le ferroviaire, avec notamment une multiplication par 3,6 à 4 pour le TGV et par 5,4 pour le fret ferroviaire. Ces projections peuvent être aujourd'hui jugées extrêmement optimistes, le fret ferroviaire ayant décru de plus de 40% entre 2000 et 2014 (CGDD, 2016b).

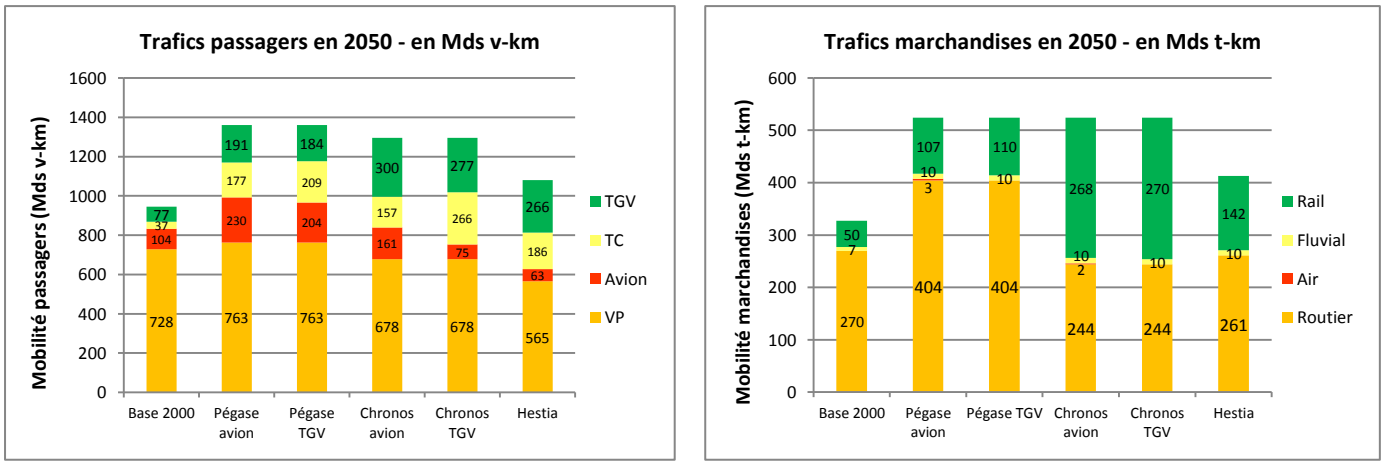


Figure 54 : Trafics passagers et marchandises en 2050 (repris d'après LET&Enerdata, 2008 et Lopez-Ruiz, 2009)
VP : voitures particulières ; TC : transports en commun autres que TGV

Facteur 4 et réduction des émissions

De nombreux scénarios sont comparés, obtenus par variantes des trois qui précèdent, donnant ainsi de nombreux résultats :

- ✓ Les scénarios Pégase et Chronos sont décomposés en 2 variantes avion et TGV pour le transport longue distance. Les résultats sur les réductions d'émissions entre ces 2 scénarios diffèrent au maximum de 6% ;
- ✓ Différents scénarios technologiques sont proposés selon les choix technologiques pour les moteurs des véhicules routiers : moteurs à combustion interne (MCI), véhicules hybrides (avec 4 sous-scénarios selon leur année d'entrée sur le marché et leur diffusion), ou piles à combustible à hydrogène. Ces technologies ont une forte influence sur les résultats, faisant par exemple passer la réduction de -28% dans le scénario Pégase TGV avec MCI à -54% dans le même scénario mais avec les hypothèses les plus optimistes sur les véhicules hybrides ;

- ✓ Enfin, les résultats donnés correspondent aux émissions directes, c'est-à-dire sans compter les émissions indirectes liées au raffinage ou à la production de l'électricité et des biocarburants. Leur addition peut modifier de manière contrastée les résultats selon l'origine de l'électricité : résultats légèrement améliorés si l'électricité provient de sources renouvelables, mais des résultats de moins en moins bons avec les hypothèses d'un mix électrique compatible avec l'objectif de facteur 4, avec des centrales au gaz à cycles combinés, ou avec des centrales à charbon classiques.

La modélisation montre que les progrès techniques permettent au mieux d'atteindre un facteur 2. Un autre facteur 2 doit donc être atteint via des changements de comportement des ménages et des entreprises, dans les choix modaux et des programmes d'activités.

- ✓ Dans le scénario Pégase, seule une généralisation rapide des piles à combustible à hydrogène produit à partir de sources d'énergie non émettrices de CO_2, permettrait d'atteindre le facteur 4 ;
- ✓ Le scénario Chronos permet de se rapprocher fortement du facteur 4, sans pour autant l'atteindre pour la majorité des jeux d'hypothèses ;
- ✓ Enfin, le scénario Hestia permet d'atteindre le facteur 4 dans la plupart des cas. A nouveau les progrès sur les émissions de CO_2 sont plus forts pour la mobilité des voyageurs, à tel point que les émissions du transport de marchandises représentent plus de la moitié des émissions du secteur des transports en 2050 (Figure 55).

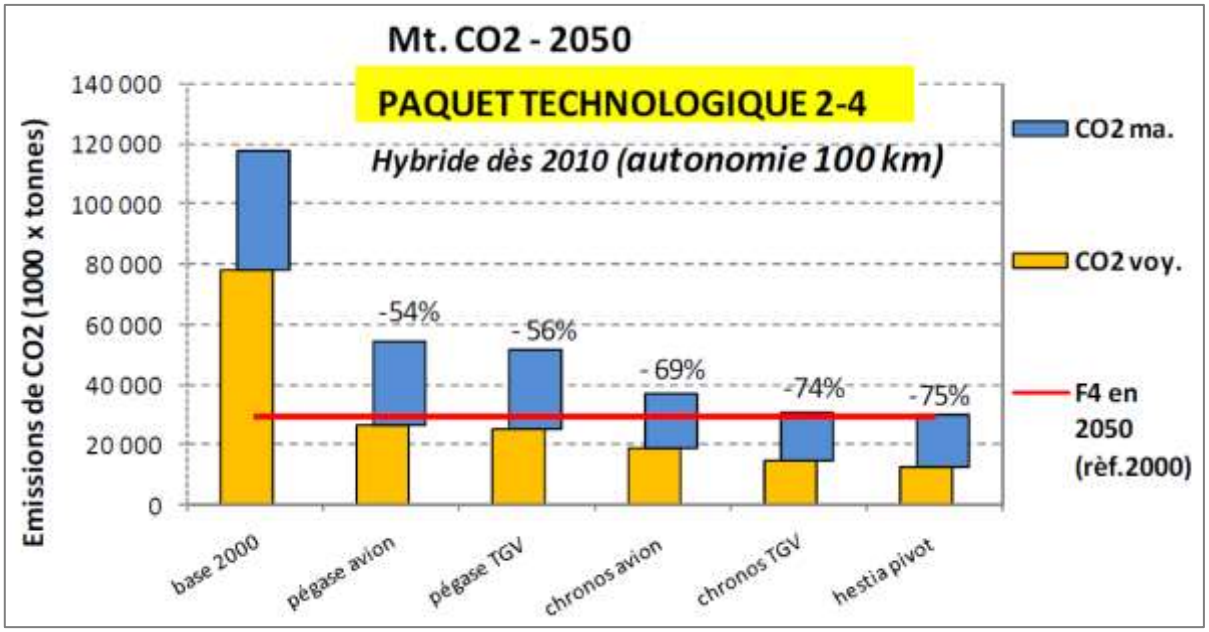


Figure 55 : Emissions directes de CO_2 des transports de voyageurs et de marchandises selon les scénarios, avec des hypothèses optimistes sur le développement des véhicules hybrides (LET&Enerdata, 2008)

D'importants efforts ont aussi été réalisés dans ce programme de recherche pour quantifier les effets de politiques publiques orientées vers les styles de vie, le marché, la réglementation et les infrastructures. L'objectif est de fournir des éléments sur les impacts positifs et négatifs de ces mesures sur les acteurs de la mobilité, sur les coûts de transport, ainsi que sur les émissions.

Enseignements pour les politiques publiques

Parmi les nombreux enseignements qui sont donnés dans les publications, il est possible de citer notamment les éléments suivants :

- ✓ Pour atteindre le facteur 4, les systèmes de transport vont devoir se transformer pour devenir plus contraints et massifiés ;
- ✓ Les scénarios combinent à chaque fois différent types de solutions, plutôt orientées vers les infrastructures publiques, la réglementation, les marchés ou les styles de vie. Leur impact relatif sur les réductions d'émissions sont détaillés dans la Figure 56 ;
- ✓ Les forts investissements nécessaires notamment pour soutenir le développement des infrastructures ferroviaires rend nécessaire une augmentation des taxes et redevances. Les politiques seront notamment confrontés à un dilemme sur le niveau de contraintes imposé au transport aérien ;
- ✓ Le fret ferroviaire étant intéressant pour des transports de marchandises inter-région massifiés, le scénario Chronos est plus favorable que le scénario Hestia dont le recentrage sur des activités de proximité limite la massification du transport moyenne et longue distance ;
- ✓ Enfin, les auteurs soulignent les mutations profondes qui sont nécessaires du point de vue des comportements de mobilité, et notamment pour tendre vers une moindre hausse des transports de voyageurs et de marchandises que par le passé. Ceci étant, ils remarquent également que les modes de vie sont plus malléables qu'on ne le croit, ils peuvent ainsi constituer un moyen d'action privilégié et potentiellement très efficace pour atteindre le facteur 4.

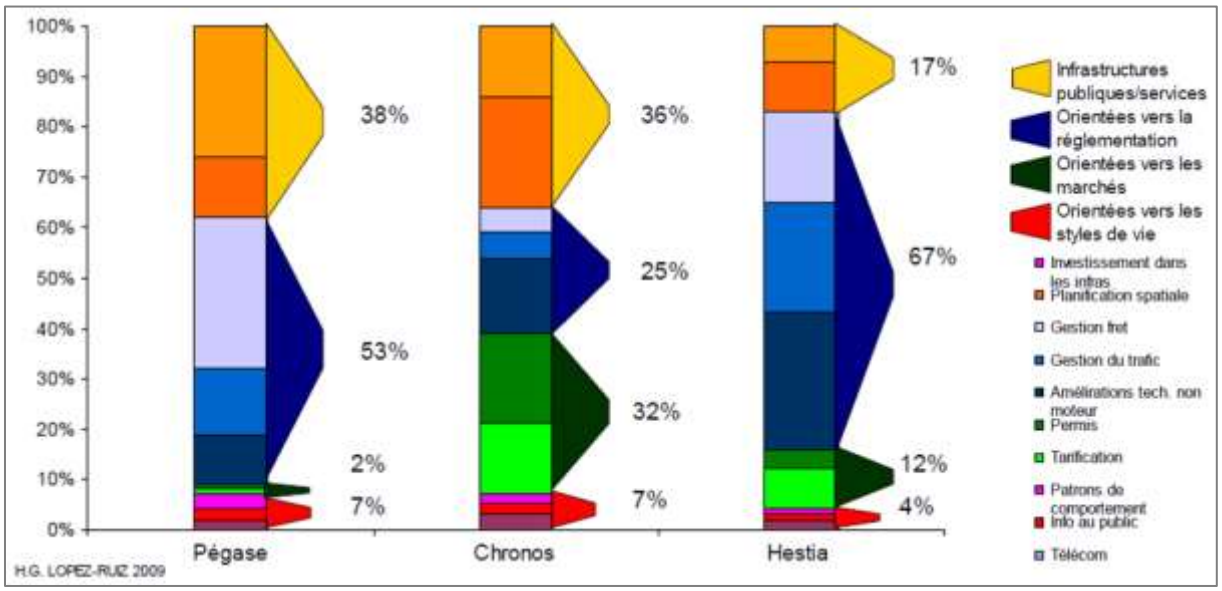


Figure 56 : Analyse de sensibilité des politiques publiques selon les scénarios, hors progrès technologiques sur les moteurs qui représentent 55% des réductions (d'après Lopez-Ruiz et Crozet, 2010 et 2011)

CGPC 2006 : démarche prospective transports 2050

Auteurs, contexte et périmètre

La démarche prospective Transports 2050 a été initiée et conduite par le Conseil Général des Ponts et Chaussées entre 2003 et 2006, à l'aide d'une démarche participative impliquant d'autres instituts et experts. L'objectif est d'apporter des premiers éléments de réflexion et de débat sur le devenir à long terme du système des transports. Ce débat servira ensuite de référence pour être enrichi de travaux complémentaires, afin de construire une vision partagée et élargie à tous les acteurs (CGPC, 2006a).

L'étude concerne l'ensemble du secteur des transports de voyageurs et de marchandises et leurs déterminants, afin d'en évaluer les évolutions de 2002 à 2050.

Le modèle

Les éléments d'entrée du modèle concernent principalement les variables démographiques, économiques, les évolutions technologiques, ainsi que les liens des transports avec l'énergie et l'effet de serre. Il donne des résultats sur l'évolution à horizon 2050 des flux de transport, du développement des modes complémentaires à la route, des besoins d'infrastructures, ainsi que des perspectives de réduction des émissions de CO_2.

Les scénarios

Quatre scénarios ont été quantifiés, à partir de quatre images possibles du contexte géopolitique mondial et européen. Selon le contexte considéré, les taux de croissance démographique et économique, les prix de l'énergie et des taxes sur le CO_2, ainsi que les progrès sur les émissions des véhicules varient, influant ainsi sur les résultats des scénarios (Figure 57) :

1. Gouvernance mondiale et industrie environnementale : la coopération mondiale sur une forte taxation du carbone et un développement des nouvelles technologies peu émettrices de CO_2 permet de diminuer fortement les émissions (-62%). L'Europe aboutit à un modèle fédéral et maintient un fort potentiel industriel ;
2. Repli européen et déclin : c'est le scénario le plus pessimiste de tous, marquée par un manque de gouvernance au niveau mondial et européen, une faible croissance, des crises d'approvisionnement énergétiques. Malgré la plus faible croissance des flux de transports parmi les quatre scénarios, l'absence de taxation sur le CO_2 limite les progrès techniques et ainsi les émissions de CO_2 ne baissent que de 18% ;
3. Grande Europe économique : la croissance économique est forte (à 2 %/an), dans un contexte d'Europe politique renforcée et d'une plus grande intégration économique avec le pourtour méditerranéen et la CEI. C'est le scénario dans lequel la mobilité est la plus forte avec notamment un triplement du trafic aérien, avec pour conséquence des émissions de CO_2 qui ne baissent que de 8%.
4. Gouvernance européenne et régionalisation : l'Europe accorde une place importante à l'emploi et aux valeurs environnementales, tendant vers une économie plus locale et un prix élevé de l'énergie. La mobilité terrestre n'est que modérément ralentie alors que le trafic aérien est plus affecté, permettant une baisse de 37% du CO_2 émis.

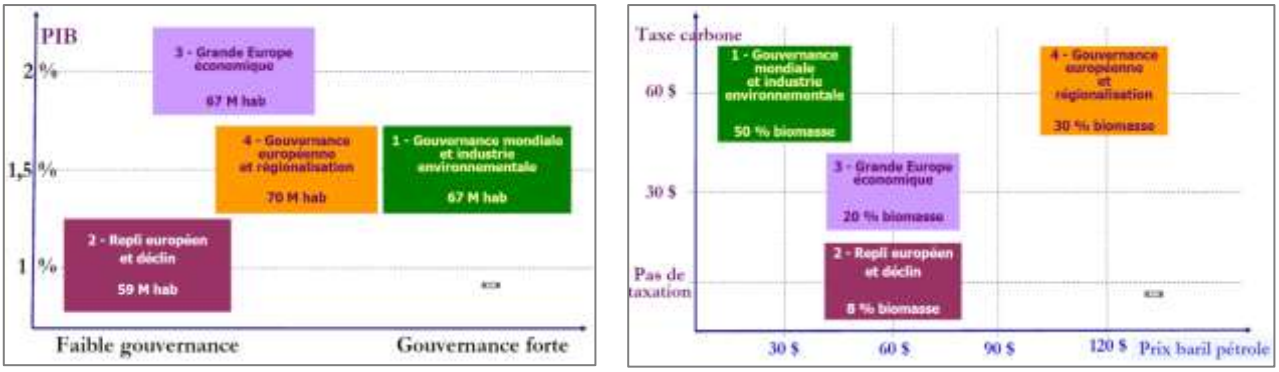


Figure 57 : Hypothèses clés des scénarios (CGPC, 2006b)

Principaux résultats et enseignements

Les résultats présentés ci-dessous correspondent aux enseignements généraux qui sont communs aux quatre scénarios étudiés.

Demande de transport et parts modales

Le premier enseignement de l'étude est que la croissance des flux de transport sera plus modérée à l'avenir que dans les décennies qui ont précédé, en raison du ralentissement démographique, de la stabilité des vitesses et des limites du budget-temps dans les transports, de la maturité de l'équipement motorisé des ménages, ou encore de la hausse des prix du transport (4D, 2008). Cette évolution majeure aura notamment des implications sur le ralentissement des consommations énergétiques et des besoins nouveaux en infrastructures.

Ensuite, le mode routier restera prédominant dans tous les scénarios, malgré le développement des modes alternatifs, du fait du maillage du territoire qu'il permet, et du besoin d'axes massifiés pour les transports en commun de voyageurs. De même, il apparait que les volumes de trafics sont relativement peu sensibles aux variations des prix de l'énergie.

Facteur 4 et réduction des émissions

Il apparait qu'une réduction importante des émissions de CO_2 est possible technologiquement, cependant elle n'est pas suffisante pour atteindre le facteur 4, le scénario 1 permettant au mieux d'atteindre un facteur 2,6. Ce résultat est rendu possible par une forte taxation du CO_2 et un développement technologique important, en particulier sur les véhicules électriques et les biocarburants qui représentent chacun un tiers du parc en 2050.

Ces résultats assez pessimistes peuvent s'expliquer par des hypothèses plutôt conservatrices sur la technologie, avec par exemple un parc de véhicules en moyenne entre 90 et 120 gCO_2/km en 2050, alors que les ventes de véhicules en France avaient atteint 117 g dès 2013 (ADEME, 2016a). De même, peu d'hypothèses sont faites sur les changements de comportement et des modes de vie, leviers puissants de la transition dans les transports.

Enseignements de l'étude

Parmi les enjeux soulevés par l'étude, il est possible de citer :

- ✓ Pour les politiques publiques : donner une priorité à la recherche-développement et pousser une politique normative et de tarification du CO_2 volontariste pour réduire les émissions ; traiter les goulets des réseaux d'infrastructures ;
- ✓ Les thématiques à approfondir : les évolutions technologiques, des modes de vie, l'habitat et les services de proximité, les loisirs et le tourisme, les évolutions des organisations, et la sûreté-sécurité.