

Transports et Energie en Île-de-France

**- Rapport de synthèse -
*contribution du sous-groupe « Energie » du groupe
“Mobilité et Transports”***

Août 2006

Ce rapport est le fruit d'un groupe de travail composé de :

IAURIF : Louis SERVANT
Alain MEYERE

DREIF : Séverine CARPENTIER

STIF : Jonathan GOLDBERG

Le groupe de travail remercie l'ensemble des personnes qui ont été sollicitées, à titre divers, et ont apporté leur contribution.

SOMMAIRE

Avant-propos	7
Introduction	9
1. Les enjeux.....	11
1.1. Le pétrole : tensions actuelles du marché, maximum mondial de production et prix du baril durablement élevé, raréfaction croissante.	11
1.2. La maîtrise de l'effet de serre additionnel d'origine anthropique : une contrainte très forte pour les transports routiers.	13
2. Les spécificités de l'Ile-de-France.....	15
2.1. Une meilleure efficacité que le reste du territoire national :	15
2.2. Une dépendance forte à l'égard des hydrocarbures.....	15
2.3. Transports terrestres et consommation d'énergie	16
2.4. Gaz à effet de serre : 9% des émissions nationales	18
2.5. Quelles actions pour les transports ?	20
3. Les différents scénarios nationaux déjà examinés	21
3.1. Le scénario tendanciel 2030	21
3.2. Le scénario 2050 « souhaitable »	24
4. Les évolutions technologiques des moteurs pour la propulsion des véhicules automobiles routiers.....	29
5. La stratégie à suivre.	33
5.1. Le pic pétrolier est l'enjeu qui devrait se manifester en premier, à court ou moyen terme (entre 2010 et 2030). Pourtant ce n'est pas celui qui est le plus contraignant.	33
5.2. En fait c'est l'effet de serre additionnel d'origine anthropique qui est l'enjeu le plus contraignant, bien qu'il se situe dans une perspective de long terme (2050 et au-delà). 33	
5.3. La stratégie à suivre : amorcer tout de suite le virage vers des transports franciliens sensiblement plus économes en énergie et surtout émettant globalement (en cycle de vie) peu (ou pas) de gaz à effet de serre.....	34
6. Les actions possibles.....	37
6.1. Aménagement	37
6.2. Organisation des transports.....	38
6.3. Infrastructures de transport	38
6.4. Exploitation des infrastructures de transport.....	39
6.5. Réglementation du transport et de ses prix	40
6.6. Développement d'une nouvelle génération de véhicules et de carburants	40
6.7. Incitation à des comportements vertueux.....	41
6.8. Organisation de la société	42
6.9. En cas de crise.....	42
Bibliographie	44
Annexes.....	45
Annexe 1	47
Les consommations énergétiques finales en Ile-de-France. Évolution 1990-2002. Comparaison avec les consommations énergétiques finales de la France métropolitaine	
Annexe 2 - Fiche de lecture	55
Impact des politiques climatiques sur le prix du carbone et les marchés de l'énergie	
Annexe 3 - Fiche de lecture	59
« La division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 ». Pierre Radanne. MIES, mars 2004.	
Annexe 4 - Fiche de lecture	63
« Étude pour une prospective énergétique concernant la France ». ENERDATA-DGEMP, février 2005.	
Annexe 5	69
Les nouvelles technologies énergétiques pour la propulsion des véhicules automobiles routiers destinées à réduire leurs émissions de gaz carbonique (CO2).	

« *La prévision est difficile, surtout quand elle concerne l'avenir* » (Pierre DAC)
 « *L'avenir ne se prévoit pas, il se prépare* » (Fernand BRAUDEL)
 « *L'art du politique est de faire en sorte qu'il soit de l'intérêt de chacun d'être vertueux* »
 (Claude Adrien HELVÉTIUS)

Avant-propos

Les tensions sur le marché de l'énergie consécutives à la guerre d'Irak ont à nouveau placé la question énergétique au cœur des préoccupations et remis en mémoire le premier choc pétrolier des années 70 avec ses conséquences immédiates et à plus long terme.

Les conditions actuelles sont cependant différentes. Nos économies paraissent moins vulnérables même si certaines activités comme le transport restent quasi totalement dépendantes des hydrocarbures, mais les informations dont disposons aujourd'hui nous conduisent à intégrer deux phénomènes majeurs dont nous avons peu conscience il y a 40 ans : l'épuisement annoncé des ressources énergétiques d'origine fossile et le rôle des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur le climat.

Si le phénomène du *peak oil* ne fait aucun doute, les opinions des spécialistes ne convergent pas pour en fournir une date approximative dont l'occurrence pourrait se situer entre 2015 et 2050. Les raisons de ces désaccords sont multiples : incertitudes techniques sur les données, manipulations politiques, divergences d'appréciation quant aux capacités d'adaptation,...etc. Le groupe de travail ne s'est pas senti en capacité de trancher cette question mais l'a intégrée dans ses réflexions pour s'interroger sur ses conséquences. A cet égard, on peut distinguer deux scénarios qui ont en commun de considérer que nous inaugurons une période de pénurie croissante due à l'épuisement de la ressource pétrolière et à l'augmentation de la demande mondiale. Le premier consiste à imaginer un coût de plus en plus élevé du baril de pétrole pouvant conduire, à un rythme plus ou moins rapide, à des valeurs de l'ordre de 300\$ le baril forçant ainsi les individus et les agents économiques, qu'ils le veuillent ou non, à s'adapter par des comportements plus vertueux, c'est à dire moins consommateurs en réduisant ou en renonçant aux activités les plus dispendieuses. Ce scénario, qui se traduit par une remise en cause radicale de nos modes de vie et du modèle économique dominant, fait implicitement l'hypothèse qu'il n'existe pas de réponse alternative à la contrainte pétrolière et conclut au caractère inéluctable d'adaptations dont il s'agit alors d'atténuer les conséquences en les anticipant. Le deuxième scénario est à certains égards plus inquiétant car il ne débouche pas, bien au contraire, sur des comportements plus vertueux. Ce scénario part du même constat que le précédent mais imagine que, pour échapper à la dépendance à l'égard du pétrole et à la hausse prévisible de son prix, les agents économiques auront recours de façon accrue à des énergies de substitution dont le coût deviendra progressivement plus accessible. Dans ce scénario, et compte tenu de l'état des techniques, il est probable que, même si les prix élevés rendront compétitives les énergies non fossiles, on n'échappera pas à une utilisation massive d'énergies carbonées, qu'elles soient d'origine fossile comme le charbon ou non. Le bilan carbone pourrait alors être désastreux et les émissions de GES au niveau mondial s'amplifier en dépit des efforts de certains pays.

Ces deux scénarios ont en commun de s'en remettre au marché, c'est à dire aux pays ou aux firmes qui produisent l'énergie, et aux consommateurs, entreprises ou ménages, pour générer les adaptations nécessaires, avec le risque que ces adaptations soient socialement très douloureuses (en raison de capacités d'adaptation très inégales,

certains ménages ou certaines entreprises sont beaucoup plus vulnérables que d'autres à des hausses de prix) et ignorent des externalités particulièrement importantes comme les émissions de GES ou la sécurité d'approvisionnement. Dit autrement, la hausse des prix inéluctable et dont seul le rythme est incertain influencera nécessairement le comportement des agents économiques (producteurs et consommateurs) sans pour autant qu'ils soient vertueux. L'intervention publique à ses différents échelons est donc nécessaire.

Ces deux scénarios mettent en avant à juste titre l'influence du prix de l'énergie sur les comportements des consommateurs. Cependant, si le signal-prix laisse aux agents économiques le libre choix en matière d'ajustement de leurs comportements, les effets qui en résultent peuvent ne pas être bénéfiques et c'est ce que le deuxième scénario met en évidence. Afin de les orienter dans le sens d'une réduction nécessaire des émissions de GES, la fiscalité peut jouer un rôle essentiel pour dissuader les agents économiques de recourir de manière excessive aux énergies carbonées. Une taxe carbone, dont le niveau reste à définir, peut être à cet égard un instrument particulièrement efficace :

- en réduisant la demande, elle empêche des hausses des prix à la source trop élevés au profit des seuls pays producteurs
- elle procure aux pays consommateurs des ressources pour financer leur politique énergétique et en particulier les recherches en matière d'énergies de substitution.

Dans ce contexte, la nécessité de réduire les émissions de GES est une justification supplémentaire de l'intervention publique qui vient lui donner une orientation plus précise.

- pour réduire ou contenir la demande en énergie (transport aménagement performance énergétique)
- pour créer des alternatives nouvelles ou les susciter (technologies et énergies de substitution)
- pour orienter les choix des entreprises ou des individus (normes, réglementation, fiscalité)
- pour conduire et maîtriser le changement nécessaire, c'est à dire pour atténuer les coûts de transition de toutes natures et pour accélérer la mise en place de réponses adaptées.

Introduction

Les travaux du groupe en charge de traiter la problématique énergétique se sont appuyés sur les connaissances actuelles communément admises et les divers scénarios prospectifs. Ces éléments concernent aussi bien les domaines de l'offre énergétique et la disponibilité future des ressources fossiles que les évolutions technologiques prévisibles et envisageables. Les éléments spécifiques concernant l'Ile-de-France ont été identifiés et ont conduit à élaborer une stratégie ainsi qu'une liste d'actions possibles.

Le rapport est constitué de six parties auxquelles s'ajoutent cinq annexes constituées de données chiffrées et de fiches de lecture.

1. Les enjeux : fournit un cadre global sur les ressources fossiles et leur raréfaction inéluctable ainsi que sur la maîtrise de l'effet de serre additionnel et du rôle prépondérant des transports dans ce domaine.
2. Les spécificités de l'Ile-de-France : décrit la consommation énergétique de l'Ile-de-France, sa structure et son évolution ainsi que la contribution de la région aux émissions nationales de gaz à effet de serre. Des analyses spécifiques de l'enquête globale transports de 2001 fournissent des éclairages sur la dépendance des déplacements aux énergies fossiles.
3. Les différents scénarios nationaux : présente la diversité des scénarios prospectifs pour l'évolution de la consommation énergétique en France et de sa structure en terme de source d'approvisionnement et d'utilisation finale. Aux scénarios de projection de la situation actuelle s'ajoutent des scénarios présentant le chemin à parcourir pour aboutir à une situation souhaitée comme la réduction par quatre des émissions de gaz à effet de serre en 2050 (Facteur 4).
4. Les évolutions technologiques : décrit le l'impact des progrès attendus dans la conception des moteurs en termes de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre. Ces évolutions sont analysées en fonction de leur impact et de leur horizon de réalisation attendue ou probable.
5. La stratégie à suivre : synthétise l'éventail des réponses à apporter pour relever les défis liés de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre en particulier dans le domaine des transports.
6. Les actions possibles : propose des initiatives à prendre dès à présent pour mettre en œuvre la stratégie décrite ci-dessus. Les actions sont classées par domaine d'intervention et caractérisées par leur difficulté de mise en œuvre, l'incertitude éventuelle de leurs effets et l'horizon d'occurrence pour les impacts attendus.

1. Les enjeux.

Comme tout le monde le sait et comme cela sera précisé quantitativement par la suite (§2) les transports régionaux franciliens (hors aviation) sont très fortement dépendants du pétrole pour leur énergie (à hauteur de 95%). Or le pétrole est une énergie fossile non renouvelable qui se raréfiera inexorablement et dont la combustion contribue largement à l'effet de serre additionnel créé par les activités humaines : au niveau mondial il est à l'origine de 41% des émissions de gaz carbonique (CO₂) en 2003 [1]. Le secteur transports est responsable de 24% des émissions de CO₂ (données 2002) ; de plus ses émissions de CO₂ ne cessent de croître (+28% entre 1990 et 2002) [2].

A l'instar des transports mondiaux, les deux enjeux énergétiques majeurs auxquels doivent répondre les transports franciliens sont la réduction de leur dépendance au pétrole et la baisse de leurs émissions de CO₂. Quelle est l'importance de ces deux enjeux ?

1.1. Le pétrole : tensions actuelles du marché, maximum mondial de production et prix du baril durablement élevé, raréfaction croissante.

Depuis fin 2004 le marché du pétrole demeure tendu et le prix du baril oscille aux alentours de 50-60 dollars US. La plupart des spécialistes attribuent cette flambée à une cause conjoncturelle : la sous-estimation de l'accélération la croissance mondiale de la demande (+0,4% en 2001, +0,8% en 2002, +1,7% en 2003 puis +3,4% en 2004), ce qui s'est traduit par un sous-investissement tant dans les capacités d'exploitation que dans celles du raffinage.

On pourrait croire qu'à moyen et long terme le problème serait résolu si on faisait les investissements nécessaires. Or il n'en est rien car un autre problème autrement plus redoutable se produira à moyen terme : le maximum de production mondiale du pétrole¹, quels que soient les moyens techniques mis en œuvre pour l'extraire. Plusieurs pays ont déjà atteint leur maximum de production. Les Etats-Unis, de loin le premier producteur à la fin de la seconde guerre mondiale, l'ont atteint en 1970 : cette année-là la production moyenne fut de 9,4 millions de barils par jour ; en 2004 elle n'était que de 7,2 millions de barils par jour (soit 23% de moins) malgré l'apport du pétrole d'Alaska² (0,9 million de barils par jour en 2004) dont la production était très faible en 1970³.

La prévision de la date du « pic » pétrolier est délicate à faire.

En premier lieu il est difficile d'estimer les réserves « prouvées »⁴ : Olivier Appert, président de l'IFP (Institut Français du Pétrole), expliquait que « évaluer les réserves d'un champ de pétrole, c'est comme essayer de deviner le stock d'un entrepôt en regardant par le trou de la serrure »[3].

En outre il n'existe pas de méthode d'évaluation universelle contrôlée par un organisme indépendant ; les données officielles sont celles déclarées par les pays producteurs et les

¹ Ce maximum est désigné « pic » de HUBBERT, par référence à M. King HUBBERT, géophysicien américain qui a prédit que la production des Etats-Unis atteindrait son maximum vers le début des années 1970 (ce maximum fut atteint en 1970). Le terme « pic » n'est pas approprié car le maximum se fera plutôt selon un « plateau ».

² La production de pétrole en Alaska a elle-même atteint son maximum en 1988 à 2 millions de barils par jour

³ Si on ne tient pas compte du pétrole d'Alaska le niveau de production en 2004 était égal aux 2/3 de celui de 1970.

⁴ Les professionnels du pétrole parlent de « réserves prouvées » à une date donnée, c'est-à-dire la quantité de pétrole que l'on estime pouvoir extraire des gisements connus à cette date de manière quasi certaine, compte-tenu des techniques et des conditions économiques existantes. La notion de réserves est donc variable dans le temps.

compagnies pétrolières internationales . Certaines sont largement sujettes à caution. Par exemple, en 1985 l'OPEP a pris la décision d'indexer les quotas de production de ses pays membres sur les réserves déclarées : plus on déclare de pétrole, plus le niveau de production est élevé. On a alors constaté qu'entre 1985 et la guerre du Golfe (1991) les principaux pays de l'OPEP ont multiplié par 1,9 le montant de leurs réserves « prouvées », « sans qu'on sache quelles découvertes significatives permettaient de justifier des augmentations aussi énormes »⁵. Plus récemment, en janvier 2004, c'était le « scandale Shell » : la compagnie a dû admettre qu'environ un tiers de ses réserves « prouvées » était fictif⁶. En mai 2005 Matthew SIMMONS, banquier d'affaires très en vue à Houston et ex-conseiller clef de Dick CHENEY au sein de la « task force » chargée d'élaborer la politique énergétique américaine du gouvernement Bush (en 2001), publiait « Crépuscule dans le désert », un livre très documenté où il accuse l'Arabie saoudite de surestimer ses réserves.

Enfin, au milieu de toutes ces incertitudes, intervient un élément subjectif : pessimisme ou optimisme, selon le tempérament et/ou l'intérêt en jeu. Les pessimistes sont plutôt les géologues, les optimistes les économistes.

Mais personne ne met en doute l'évidence : il y aura un « pic pétrole » bien avant son épuisement total.

Finalement les prévisions vont de « avant 2010 » jusqu'à 2030. On peut retenir une prévision « moyenne » aux alentours de 2015-2020.

Quoi qu'il en soit la tendance à moyen terme sera un pétrole durablement cher (là encore les prévisions varient énormément, de 50\$ le baril à 200\$ ou même plus).

Si les pessimistes ont raison les tensions sur le marché feront monter le prix du baril dès le court terme.

Quant aux optimistes ils tablent sur des découvertes nouvelles et surtout sur les progrès techniques futurs qui permettront d'extraire du pétrole « non conventionnel » (non extrait avec les technologies existantes et dans les conditions économiques actuelles) : offshore profond, sables asphaltiques, schistes bitumineux entre autres. Mais cela coûtera sensiblement plus cher que le « pétrole conventionnel » extrait aujourd'hui.

Après le pic pétrolier la raréfaction de cette énergie fossile se fera sentir de plus en plus car on aura une production en baisse alors que la tendance de la demande est en hausse. A titre « d'exercice d'école », si on constate à partir d'une date t_0 donnée une baisse de 1% par an de la production de pétrole fossile (constat à partir du cas américain) et une hausse de 1,6% par an de la demande de pétrole (hypothèse de l'Agence Internationale de l'Energie jusqu'à 2030) on arrive aux résultats suivants : à (t_0+5) ans la production de pétrole fossile conventionnel ne représente que 88% de la demande (pénurie de 12%), à (t_0+10) seulement 77% (pénurie de 23%), à (t_0+15) seulement 68% (pénurie de 32%), à (t_0+20) seulement 60% (pénurie de 40%), etc

Cela donne une idée de l'effort à faire pour réduire la dépendance au pétrole fossile si on ne s'y prépare pas à l'avance.

Si rien n'est fait et si on se laisse surprendre par le pic pétrolier on sera amené à adopter des mesures radicales à mettre en œuvre rapidement (cf écart demande-production de pétrole fossile de 12% au bout de seulement 5 ans dans notre calcul). La rupture nécessaire et promptement tant en comportements (réduction de la demande) qu'en solutions techniques (transfert vers d'autres énergies -fossiles ou pas-, pétrole de synthèse, etc) ne se fera pas sans dommages économiques et sociaux.

Or les transports routiers vont dépendre pendant longtemps du pétrole. Tout d'abord parce que les solutions alternatives actuelles sont partielles (gaz, biocarburants, électricité, véhicules hybrides) et, pour l'instant, plus coûteuses que le pétrole. Ensuite

⁵ Olivier APPERT cité dans : « Pétrole. La panne sèche ? » (Matthieu AUZANNEAU et Guillaume SERINA, Le Monde 1^{er} octobre 2005)

⁶ Sir Philips WATTS, alors PDG de Shell a dû démissionner. Le directeur de l'exploration et de la production - Walter VAN DE VIJVER- a également dû démissionner malgré les preuves qu'il avait alerté la direction de Shell dès 2001. (Il a gagné son procès contre Shell et obtenu une indemnité conséquente : quatre fois celle de son ancien PDG)

parce que la solution de rupture (la pile à combustible⁷) n'est pas encore au point industriellement et coûte encore très cher. Enfin parce que le renouvellement du parc possède une inertie très importante - 13 ans pour 50% du parc et 24 ans pour 95% - et que les mesures d'accélération de ce renouvellement n'ont pas un effet majeur ; par exemple la mise en vigueur d'une norme ne raccourcit les délais précités que de 3,5 ans [4].

Selon les constructeurs automobiles, l'ensemble des nouvelles technologies envisageables ne devrait représenter que 14% du marché à l'horizon 2020 [5] (source RENAULT).

Si le « pic pétrole » se produit cette année-là (voire quelques années après ou, pire, avant 2020) il touchera durement le secteur transport encore très dépendant techniquement du pétrole. Il faut s'y préparer.

1.2. La maîtrise de l'effet de serre additionnel d'origine anthropique : une contrainte très forte pour les transports routiers.

L'effet de serre est un phénomène naturel à la base de la vie sur terre. Sans lui, la température moyenne à la surface de la planète serait de -18°C au lieu des $+15^{\circ}\text{C}$ constatés. Les deux gaz les plus importants dans cet effet de serre naturel sont la vapeur d'eau et le gaz carbonique.

Sans activité humaine les émissions et absorptions de gaz à effet de serre (GES) s'équilibrent.

L'effet de serre additionnel (ou réchauffement climatique) provient des gaz à effet de serre (GES) additionnels liés aux activités humaines.

Ces GES d'origine anthropique sont, dans l'ordre décroissant de leur contribution à l'effet de serre additionnel : le gaz carbonique CO_2 (65%), le méthane CH_4 (20%), les halocarbures⁸ $\text{C}_x\text{H}_y\text{Hal}_z$ (10%), le protoxyde d'azote N_2O (5%), l'ozone troposphérique O_3 (5%) et les substituts des chlorofluorocarbones CFC (négligeable).

Ici on ne s'intéresse qu'au CO_2 qui est le GES typique des transports. Dans la pratique on exprime souvent les émissions de CO_2 en équivalent carbone C^9 .

Actuellement les activités humaines émettent $7,9 \text{ GtC}^{10}$ par an [6] (source GIEC) : 6,3 sont imputables aux combustions et 1,6 aux changements d'usage des sols (essentiellement la déforestation). Les océans et la biosphère continentale en absorbent chacun 2,3 GtC (4,6 au total) de sorte qu'il en reste 3,3 GtC (soit $12,11 \text{ GtCO}_2$) qui s'accumulent dans l'atmosphère et créent un effet de serre additionnel.

Ainsi entre 1750 (début de l'ère industrielle) et l'an 2000 la concentration atmosphérique de CO_2 est passée de 280 à 368 ppmv^{11} , soit une augmentation de +31%.

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), pour le seul $\text{XX}^{\text{ième}}$ siècle l'augmentation de température moyenne fut de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, un rythme de croissance jamais atteint depuis des millénaires. Si rien n'est fait des perturbations climatiques de plus en plus graves se produiront sans que l'humanité puisse les arrêter ; comme l'indique M. Marcel DENEUX, sénateur, dans son rapport sur le changement climatique [7] : **« sur le vaisseau spatial Terre, l'homme n'est pas à même de régler la climatisation, mais en la dérégulant il risque d'y perturber la vie. »**

Au niveau de l'Ile-de-France Mme Dominique DRON, responsable du pôle Développement Durable à l'École des mines de Paris, décrit les conséquences possibles d'inondations

⁷ Pile à combustible : générateur d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène via une réaction électrochimique (réaction inverse de l'électrolyse de l'eau).

⁸ Dont les fameux CFC (Chloro-Fluoro-Carbones). Dans la formule Hal désigne un gaz halogène (Fluor, Chlore, ...)

⁹ Un kg C vaut 3,67 kg CO_2 car une molécule de CO_2 a une masse 3,67 fois plus élevée qu'une molécule de carbone C.

¹⁰ GtC : giga (milliards) de tonnes carbone

¹¹ Ppmv : parties par million en volume ; 370 ppmv de CO_2 signifie que le CO_2 occupe actuellement 0,037% du volume de l'atmosphère.

exceptionnelles : « Pour ce qui concerne les villes, pour des pluies de même intensité, la crue « 1910 » serait plus haute de 70 cm environ compte tenu de l'imperméabilisation explosive du XX^{ième} siècle, concernerait 880.000 personnes et 170.000 entreprises ; pendant au moins un mois, l'approvisionnement en eau potable serait perturbé à 50%, le métro et le RER à 70% ; 200.000 personnes se trouveraient sans téléphone, et un million sans électricité, pour un coût total évalué à 30 milliards d'euros (source CGP 2005). Or les pluies extrêmes jusqu'ici « centennales » seront plus fréquentes et plus intenses du fait du réchauffement global. » [8]

Compte tenu des conséquences graves à long terme du réchauffement de la planète les experts du GIEC considèrent qu'il est hautement souhaitable de stabiliser les concentrations de GES, dont le CO₂, à l'horizon 2050 afin de contenir ce réchauffement¹². Comme les émissions de CO₂ liées aux combustions correspondent actuellement à 1 tC par habitant il faut arriver à seulement 0,5 tC par habitant en 2050 (on rappelle que les océans et la biosphère continentale n'absorbent que la moitié des émissions existantes de CO₂). Pour la France cet objectif correspond à une division par 4,6 de ses émissions de CO₂ par rapport à l'évolution tendancielle [9].

C'est pourquoi l'article 2 de la récente loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique stipule « la France soutient la définition d'un objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050, ce qui nécessite, compte tenu des différences de consommation entre pays, une division par quatre ou cinq de ces émissions pour les pays développés. »

Comme on le verra plus loin les scénarios « facteur 4 » existants destinés à faire ressortir les implications de l'objectif de l'article 2 de la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 montrent ***la nécessité de rompre radicalement avec la dépendance pétrolière fossile.***

Pour illustrer ce propos on rappelle qu'en 2002 les seuls transports terrestres de la France métropolitaine émettaient 1,1 fois plus de CO₂ que le niveau souhaitable en 2050 tous secteurs d'activités confondus (transports, résidentiel, tertiaire, industrie, etc)¹³.

Or, comme le relève M. Pierre RADANNE « le pétrole est irremplaçable dans les transports aérien et maritime et (dans) le transport routier de marchandises sur moyenne et longue distance »[9].

C'est donc dans les transports terrestres de voyageurs de moyenne et longue distance et tous ceux de courte distance -essentiellement les déplacements urbains et régionaux- que les réductions d'émission de CO₂ devront se faire en priorité, à la fois par le biais de la technologie et par des modifications dans l'organisation urbaine, l'économie, la vie sociale et les comportements.

¹² Cela revient à diviser par deux les émissions mondiales de GES d'ici 2050. Cet objectif est très au-delà du Protocole de Kyoto (1997) qui ne s'appliquait qu'aux seuls pays développés pour lesquels on prévoyait de réduire leurs émissions de GES de 5,2% par rapport à l'année 1990 pour la période 2008-2012 (8% pour l'Union européenne ; 0% pour la France). On sait que cet objectif ne sera vraisemblablement pas atteint (au niveau mondial), notamment à cause du refus des Etats-Unis de signer ce Protocole.

¹³ Soit 134 MtCO₂ émis par les transports terrestres de la France métropolitaine en 2002 pour 117 MtCO₂ souhaitables en 2050 (Calculs IAURIF effectués à partir de données DGEMP et MIES-RADANNE)

2. Les spécificités de l'Ile-de-France.

(pour plus de détails voir annexe 1)

2.1. Une meilleure efficacité que le reste du territoire national :

Avec 19% de la population et 28% du PIB, l'Ile-de-France ne représente que 16% de la consommation finale nationale, et 13% si l'on exclut l'énergie consommée par le transport aérien. Rapportée à sa population, sa consommation est de 2,15 tep par habitant en 2002, inférieure de 20% à la moyenne nationale. Son intensité énergétique, (rapport de sa consommation à la richesse produite, c'est à dire au PIB), d'un montant 54 tep/million d'euros, est en 2002 inférieure de 46% à la moyenne nationale.

	1990	2002	Evolution
Population RIF (millions d'hab.)	10,66	11,205	5%
Population France (millions d'hab.)	56,615	59,856	6%
PIB RIF en volume (G€ 2004)	346,29	443,97	28%
PIB National en volume (G€ 2004)	1 256,99	1 598,21	27%
Conso RIF (ktep)	21179	24109	14%
Conso France (ktep)	142590	159837	12%
Conso énergétique RIF par habitant (tep/hab) [1]	1,99	2,15	8%
Conso énergétique France par habitant (tep/hab) [2]	2,52	2,67	6%
Intensité énergétique RIF (tep/M€) [3]	61	54	-11%
Intensité énergétique France (tep/M€) [4]	113	100	-12%
Ratio [1]/[2]	79%	81%	
Ratio [3]/[4]	54%	54%	

Sources : INSEE, DGEMP

Cette plus grande efficacité tient à deux facteurs principaux :

- ⇒ La structure de ses activités, avec un poids plus faible de l'industrie et du secteur agricole en Ile-de-France
- ⇒ La meilleure performance énergétique de son système des déplacements.

2.2. Une dépendance forte à l'égard des hydrocarbures

Alors qu'au plan national, les deux tiers de l'énergie finale consommée sont constitués d'hydrocarbures (produits pétroliers et gaz), cette proportion est de près de 75% en Ile-de-France, en raison d'un moindre recours au bois et au charbon pour le chauffage des bâtiments, ou aux combustibles minéraux et solides dans l'industrie.

Consommation IDF en 2002	Electricité	Produits pétroliers	Gaz	CMS (1)	Chauffage urbain	Autres (2)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	8,0%	3,6%	13,2%		2,5%	1,0%	28,4%
Tertiaire	8,7%	3,1%	7,6%		1,3%		20,8%
Transports aériens		20,4%					20,4%
Transports régionaux	1,2%	20,8%					22,0%
Industrie	2,3%	0,3%	4,4%	0,1%		0,4%	7,5%
BTP	0,5%		0,0%				0,5%
Agriculture	0,0%	0,3%	0,0%				0,4%
Total par forme d'énergie	20,8%	48,6%	25,3%	0,1%	3,8%	1,4%	100,0%

(1) : combustibles minéraux et solides (houille, lignite, coke de houille)

(2) : bois, charbon, achat de vapeur (industrie)

Source : DGEMP – observatoire de l'énergie

La dépendance à l'égard des hydrocarbures est élevée dans tous les secteurs, quel que soit leur poids, à l'exception du BTP qui, en Ile-de-France, utilise à 95% de l'énergie électrique :

Secteur	Dépendance aux hydrocarbures France entière (année 2002)	Dépendance aux hydrocarbures Ile-de-France (année 2002)
Résidentiel	52,1%	59,4%
Tertiaire	55,0%	51,7%
Transports aériens	100,0%	100,0%
Transports régionaux	97,9%	94,5%
Industrie	47,7%	62,7%
BTP	13,3%	4,6%
Agriculture	92,1%	93,3%
Ensemble	66,6%	73,9%

Source : DGEMP – observatoire de l'énergie.

2.3. Transports terrestres et consommation d'énergie

Les produits pétroliers représentent près de la moitié de l'énergie finale consommée en Ile-de-France. Ils sont destinés pour près de 85% aux transports qui en sont dépendants à plus de 95%. Les transports terrestres représentent la moitié de la consommation.

2.3.1. Une performance énergétique des transports terrestres qui s'améliore

Rapportée à la population, la consommation des transports terrestres est de 0,49 tep par habitant en 2002, inférieure de 33% à la moyenne nationale. Son intensité énergétique, (rapport de sa consommation à la richesse produite, c'est à dire au PIB), d'un montant 12 tep/million d'euros, est en 2002 inférieure de 55% à la moyenne nationale. Ces performances se sont améliorées depuis 1990.

	1990	2002	Evolution
Conso RIF transports terrestres (ktep)	5501	5520	+0.3%
Conso France transports terrestres (ktep)	37251	44324	+19%
Intensité énergétique RIF transports (tep/M€) [5]	16	12	-25%
Intensité énergétique France transports (tep/M€) [6]	30	28	-7%
Ratio [5]/[6]	54%	45%	-17%

Conso énergétique transports RIF par habitant (tep/hab) [7]	0,52	0,49	-6%
Conso énergétique transports France par habitant (tep/hab) [8]	0,66	0,74	+12%
Ratio [7]/[8]	78%	67%	-14%

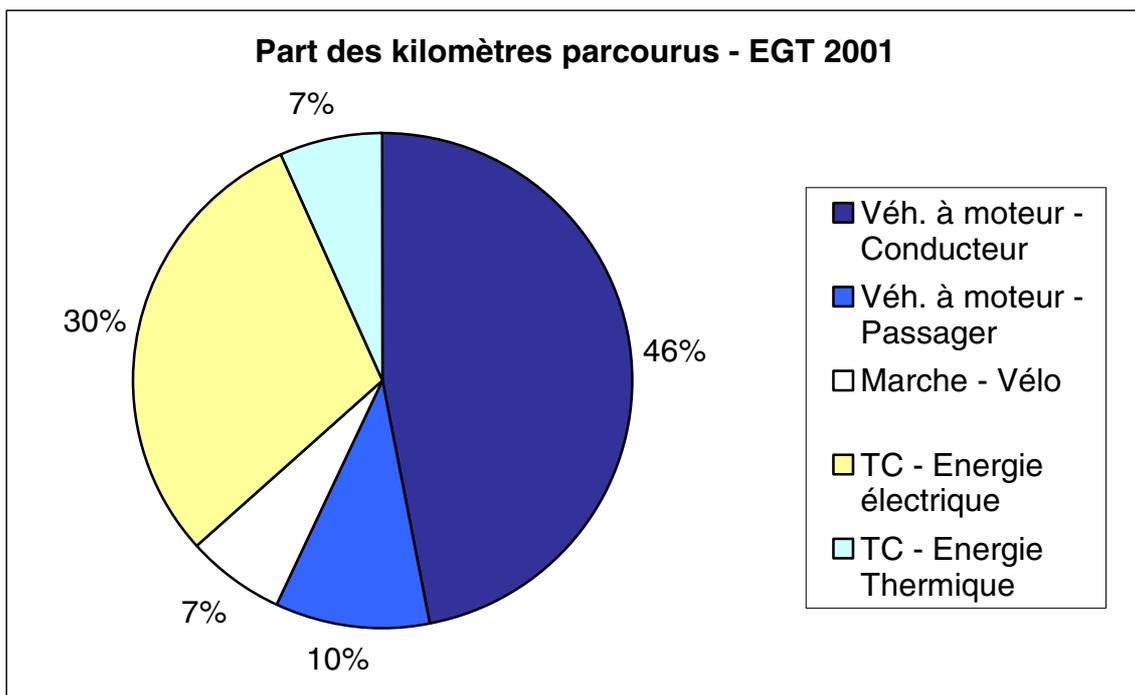
Source : DGEMP – observatoire de l'énergie 2002

La diminution de l'intensité énergétique des transports sur la période considérée est due à la combinaison de différents facteurs : améliorations technologiques, diésélisation du parc, contrebalancées par l'augmentation des distances parcourues, l'augmentation du poids des véhicules et les consommations d'équipements de confort (surtout climatisation).

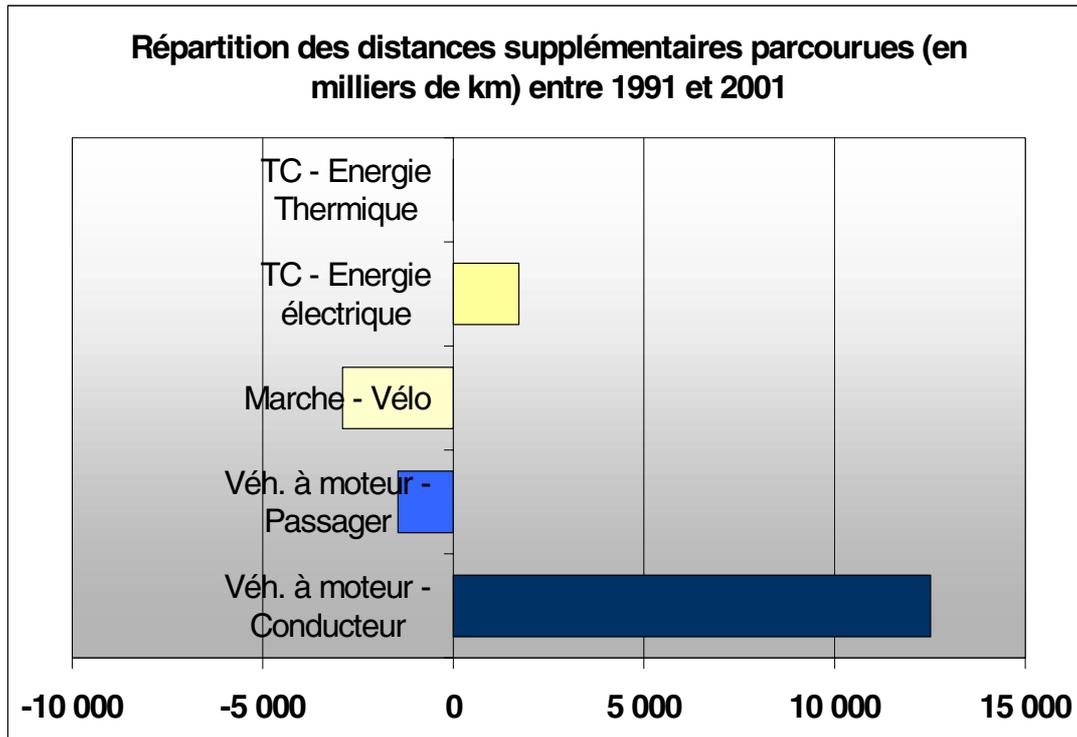
2.3.2. Mobilité quotidienne et énergie

L'analyse des résultats des enquêtes globales de mobilité (EGT) met en évidence deux phénomènes importants :

⇒ La répartition des distances parcourues par les franciliens un jour moyen de semaine met en évidence la part importante des moyens de transport n'ayant pas recours aux produits pétroliers en 2001 : de 36,3% à 46,3 % selon qu'on y inclut ou non les trajets effectués en tant que passagers. Ce résultat s'explique notamment par le rôle joué par les transports collectifs « électriques » (métro, tramway, RER et train de banlieue).



⇒ L'évolution des distances parcourues montre toutefois une dégradation de cette situation : l'augmentation des distances parcourues est due principalement aux conducteurs de véhicules à moteur, tandis que les distances des déplacements faits à pied ou en vélo se réduisent.



Sources : EGT 1991 et 2001

Cette tendance va à l'encontre d'une moindre dépendance à l'égard des produits pétroliers et devrait donc être découragée.

2.4. Gaz à effet de serre : 9% des émissions nationales

2.4.1. Les Franciliens sont moins émetteurs de GES mais la densité surfacique d'émissions est forte.

Avec 19% de la population française et 28% du PIB, l'Ile-de-France ne représente que 9% des émissions nationales de gaz à effet de serre¹⁴, soit une proportion encore plus faible que pour sa consommation énergétique (16%).

Les émissions de gaz à effet de serre (55 Mt/an) sont à 90% constituées de dioxyde de carbone CO₂ et à 8% de méthane et de N₂O.

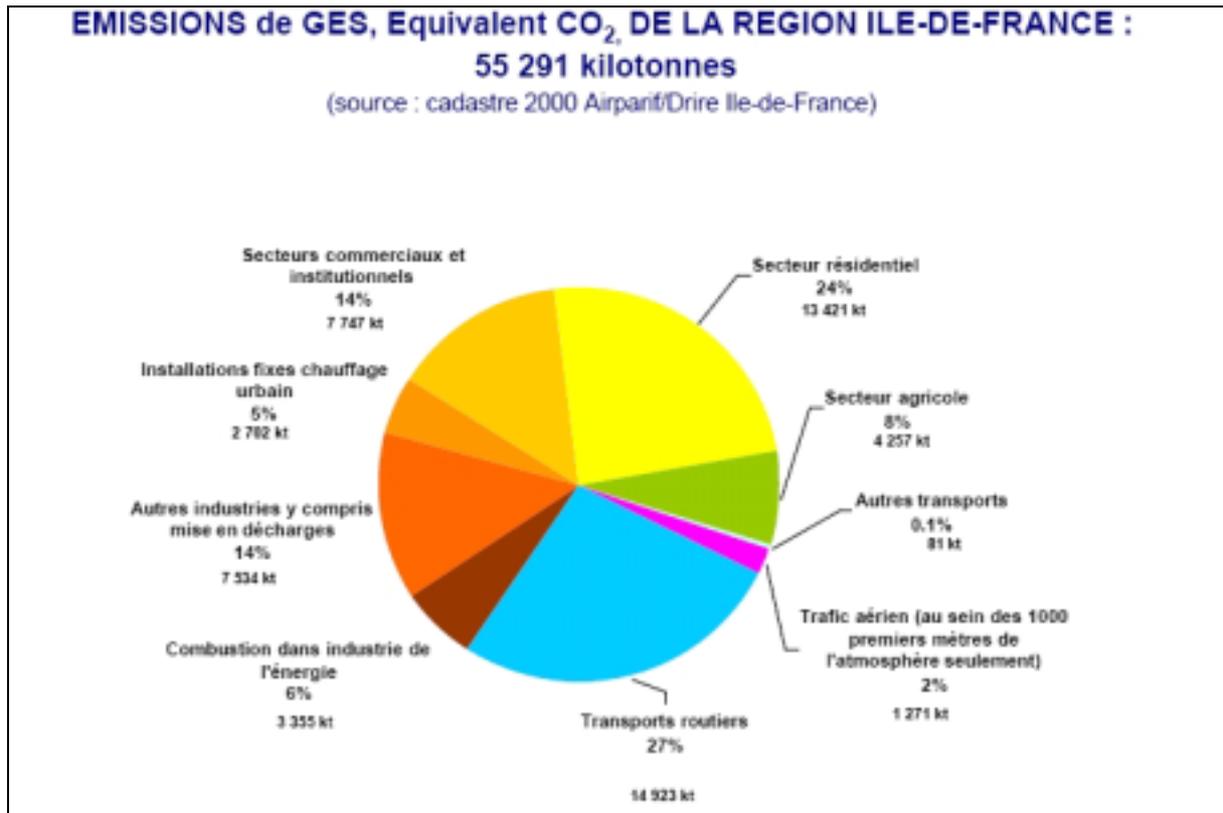
La densité d'émissions par unité de surface croit avec la densité mais il est intéressant de remarquer que les émissions par habitant décroissent avec la densité.

Ainsi, même si l'Ile-de-France arrive largement en tête des régions pour la densité surfacique d'émissions (4800 kt /km²), chaque francilien émet en moyenne 6 tonnes d'équivalent CO₂ par an contre 11 tonnes pour la moyenne nationale.

2.4.2. L'origine des GES en Ile de France.

La cadastre des émissions, réalisé par AIRPARIF permet d'identifier les différentes sources de GES qui sont pour l'Ile-de-France.

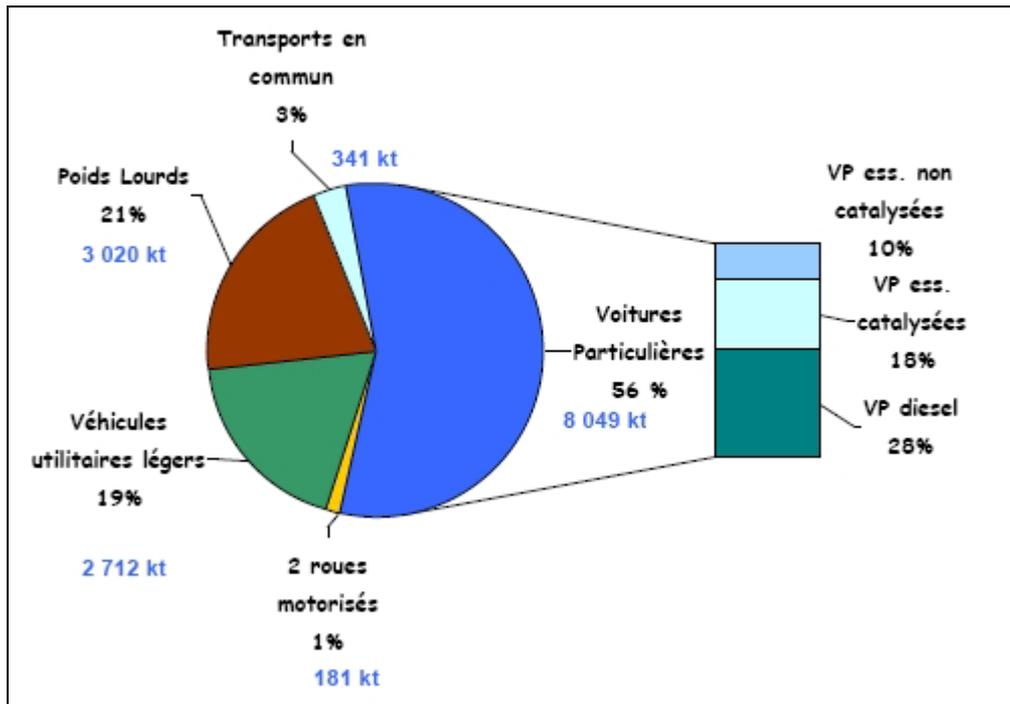
¹⁴ Source : inventaire des émissions 2000 - CITEPA



Les deux sources principales d'émissions (70% du total) sont donc :

- ⇒ La combustion non industrielle (chauffage et eau chaude) : 43%
- ⇒ Le transport routier : 27%

Pour ce dernier, plus de la moitié des émissions est due aux voitures particulières, contre moins de 3% pour les transports collectifs. Le reste des émissions est principalement lié aux poids lourds et aux véhicules utilitaires.



Source : Cadastre 2000 Airparif/Ile de France

2.5. Quelles actions pour les transports ?

Les actions à réaliser pour atteindre le facteur 4 sont à évaluer à l'aune de la réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Dans ce cadre, l'efficacité des modes électriques est supérieure aux modes thermiques dans des proportions de 1 à 30 soit bien plus que leur avantage énergétique.

Un transfert modal de la voiture particulière vers le bus est intéressant, si le bus transportent suffisamment de voyageurs (ce qui est le cas des bus RATP) mais le report vers les modes ferrés est bien plus efficace en terme d'émissions de GES.

Emissions de gaz à effet de serre du puits à la roue (en gep équivalent CO₂ par voyageur-kilomètre ; traction pure)

Mode urbain		
Voiture particulière	205	<i>Modes thermiques actuels</i>
Bus RATP	113	
Trolleybus	7,5 (6 à 9)	<i>Modes électriques</i>
RER RATP	3,6	
Metro RATP	3,5	
Tramway RATP	3 (2,6 à 3,9)	

Source : « Energie et Transports » diaporama RATP 17-01-2006

3. Les différents scénarios nationaux déjà examinés

3.1. Le scénario tendanciel 2030

(Pour plus de détails voir annexe 4)

L'observatoire de l'énergie (DGEMP) a élaboré en 2004 [10] un scénario dit tendanciel de référence qui offre une projection à l'horizon 2030, ne prenant en compte aucune mesure nouvelle autre que celles d'ores et déjà décidées fin décembre 2003, à savoir :

- ⇒ Des réglementations thermiques sur l'habitat (RT 2000 et RT 2005)
- ⇒ L'engagement des constructeurs automobiles pour une émission moyenne de 140g de CO₂ par kilomètre (accord ACEA-2010)
- ⇒ Des accords volontaires de l'industrie (AERES)
- ⇒ Une part de 21% d'énergies renouvelables à l'horizon 2010, puis une évolution tendancielle jusqu'en 2030
- ⇒ L'arrêt des centrales nucléaires à 40 ans de vie
- ⇒ La mise en service des tranches EPR à compter de 2020

Les hypothèses de cadrage macro-économique du scénario sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Cadrage macro-économique

	Evolution prévue	Source
PIB	2.3% par an	Travaux du groupe DIVA
Population 2030	63.9 millions	INSEE
Ménages 2030	29.5 millions	INSEE
Pop active 2030	26.5 millions	INSEE
Prix du pétrole 2030	30 \$ / baril	DGEMP

On remarquera que l'hypothèse macro-économique du scénario tendanciel relative à la croissance du PIB est plutôt élevée. Actuellement, on s'appuie plutôt sur une hypothèse moyenne de 1.9% entre 2002 et 2025 (source SESP)

En revanche, le prix du baril semble peu élevé, au regard des résultats à plus de 35\$ le baril fournis par le modèle POLES.

3.1.1. Les grandes tendances transport de ce scénario

Les hypothèses précédentes aboutissent aux tendances d'évolution 2001-2030 de l'activité transports résumées dans le tableau ci-après :

Les grandes tendances du secteur transport

Hypothèses transport	2001	2030	Evolution prévue 2001 - 2030	Source
Taux d'occupation des VP	1.86	1.59	-15%	METL
Parc VP	32.7	40.4	+24%	METL
Indice de consommation/véh-essence (=1 en 1990)	0.97	0.73	-25%	ADEME
Indice de consommation/véh-gazole (=1 en 1990)	0.95	0.71	-25%	ADEME
Trafic routier TC (Gvoy*km)	45	49	+9%	METL
Trafic fer TC (Gvoy*km)	72	128	+78%	METL
Trafic air TC (Mvoy)	99	374	+278%	METL
Trafic routier fret (Gtkm)	269	447	+66%	METL
Trafic fer fret (Gtkm)	50	82	+64%	METL
Trafic fluvial fret (Gtkm)	7	10	+43%	METL

VP : voiture particulière

TC : transports en commun

G : giga (milliards)

Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005

Ainsi, entre 2001 et 2030, on constaterait une augmentation de 24% du parc automobile, une très forte croissance du transport aérien de personnes de 278%, une forte croissance des transports collectifs ferroviaires de 78% et une légère croissance des transports collectifs routiers de 9%.

Pour le transport de marchandises on verrait une augmentation des trafics (en tkm) pour tous les modes, à savoir 66% pour le trafic routier, 64% pour le ferroviaire et 43% pour le fluvial. Dans ce schéma, la part de la route se maintient à son niveau de 2001 soit 83% du trafic total (en tkm).

3.1.2. La consommation énergétique finale de la France

Le scénario tendanciel prévoit pour la France, tous secteurs d'activités confondus, une augmentation de la consommation énergétique finale de 28% sur la période 2001-2030 (soit +0,9% par an), passant ainsi de 163 Mtep/an en 2001 à 209 Mtep/an en 2030 (Voir tableau ci-après)

Consommation finale d'énergie

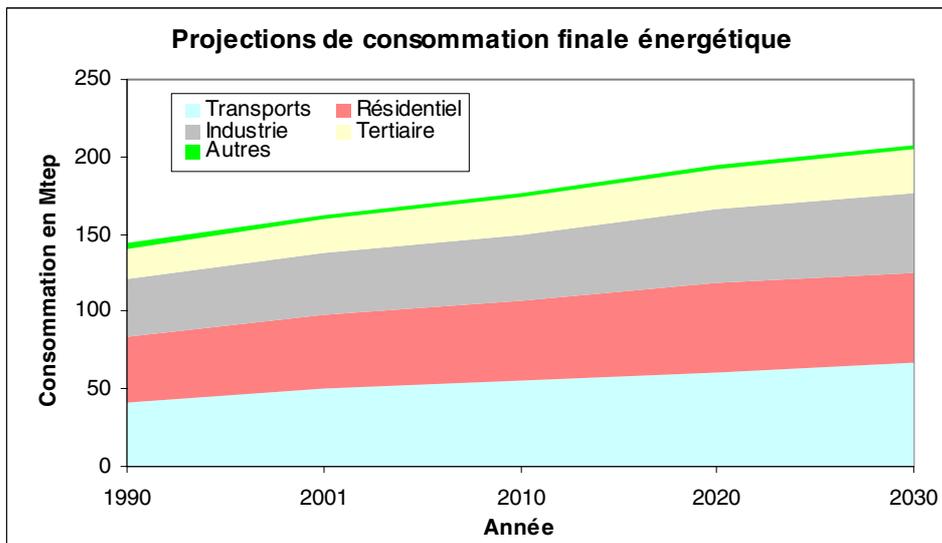
Consommation finale énergétique	2001	2030	Evolution prévue
Pétrole	77	82	+6,5% (+0.2%/an)
Gaz	33	50	+51% (+1.4%/an)
Charbon	8	7	-12,5% (-0.4%/an)
Electricité	33	52	+58% (+1.6%/an)
Autres	12	18	+50% (+1.4%/an)
Total	163	209	+28% (+0,9%/an)

Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005

Le pétrole, le gaz et l'électricité demeurent les trois grandes sources d'énergie (88% en 2001 ; 91% en 2030)

La consommation finale de pétrole croît légèrement (+6.5%) sur la période 2001-2020 puis se stabilise sur 2020-2030. En revanche les consommations finales de gaz et d'électricité croissent fortement sur toute la période 2001-2030 : +51% pour le gaz et +58% pour l'électricité.

L'analyse de la répartition de la consommation finale d'énergie par secteur d'activité, représentée dans le graphe ci-dessous, témoigne de la part non négligeable du transport qui représente environ 31% de la consommation totale (tant en 2001 qu'en 2030).



Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005

3.1.3. La vulnérabilité énergétique des transports

Même si les transports ne représentent « que 31% » de la demande d'énergie, ils représentent à eux seuls 65% de la demande de pétrole et sont aujourd'hui dépendants du pétrole ou de ses dérivés à plus de 98%. Le scénario tendanciel permet de démontrer que l'unique prise en compte des mesures déjà décidées aujourd'hui ne permet de réduire cette dépendance que de 2 points, de sorte que les transports demeurent dépendants du pétrole à plus de 95%. Par ailleurs, leur consommation énergétique ne cesse d'augmenter, passant de 52 Mtep/an en 2001 à 72 Mtep/an en 2030, soit une hausse sur la période de près de 40% (+1,1% par an), liée en grande partie à l'augmentation du trafic aérien (+11,7 Mtep/an entre 2001 et 2030) et dans une moindre mesure au trafic des camions (+4,2 Mtep/an entre 2001 et 2030).

Pour les seuls transports routiers, la demande d'énergie passerait de 42 Mtep/an à 47 Mtep/an, soit une hausse de 12%, essentiellement liée à la demande du transport routier de marchandises, qui représente environ 30% de la consommation d'énergie des transports routiers.

On voit ainsi qu'une évolution au fil de l'eau se contentant des « coups partis » et misant sur un pétrole peu cher conduirait à des consommations énergétiques accrues et à une augmentation des gaz à effet de serre.

A l'inverse, la division par 4 de ces émissions implique une série de ruptures pour casser la dépendance énergétique actuelle aux hydrocarbures.

3.2. Le scénario 2050 « souhaitable »

3.2.1. Le cadre de l'étude. Les scénarios « facteur 4 » de la MIES

(Pour plus de détails voir l'annexe 3).

L'objectif de division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici 2050 conduit à une division de l'ordre de quatre des émissions des pays industrialisés sur la même période. La France a fait sienne cette perspective.

Comment y parvenir ? Compte tenu de la nature du phénomène, seules les politiques qui s'inscriront résolument sur une longue période seront pertinentes. Préalablement, l'étude [9] réalisée par Pierre RADANNE pour le compte de la MIES analyse, pour chacun des grands secteurs émetteurs de gaz à effet de serre, les différents scénarios relatifs à leur consommation énergétique à l'horizon 2050. Il s'agit d'une approche dite « back-casting » qui consiste à définir des objectifs long-terme et à décrire par projection à rebours des scénarios permettant de les atteindre

L'horizon d'analyse étant supérieur à 30 ans, on ne se situe plus dans le domaine de la prospective dite exploratoire mais dans la prospective d'anticipation où les modèles d'optimisation et la notion de rationalité économique perdent de leur pertinence et où l'utilisation de technologies radicalement nouvelles est envisageable.

Les usages thermiques des secteurs résidentiel et tertiaire émettent à eux seuls déjà autant que ce qui sera possible en 2050, tous secteurs confondus.

Les transports émettent déjà aujourd'hui 1.3 fois plus que ce qui sera possible pour le pays en 2050, or leurs émissions continuent de croître de près de 2% par an, absorbant ainsi les progrès réalisés dans les autres secteurs. C'est plus particulièrement la partie relative au transport que nous allons présenter ici.

Cinq variantes ont été élaborées pour tester la sensibilité des évolutions possibles, dans l'objectif d'une division par quatre des émissions.

- une variante avec développement accru du nucléaire et de la pénétration de l'électricité dans tous les usages, y compris les transports
- une variante équilibrant le recours au nucléaire par développement de la cogénération et des renouvelables
- une variante maintenant une place importante aux combustibles fossiles et intégrant une séquestration du CO₂, avec allègement des contraintes de substitution, notamment dans les transports
- une variante de sortie du nucléaire avec recours à la séquestration du CO₂
- une variante de mise en place d'une filière hydrogène alimentée par des centrales nucléaires

3.2.2. Les impacts sur les transports des scénarios « facteur 4 » de la MIES

Tous les scénarios facteur 4 impliquent un niveau maximal d'émissions des transports proche de 10 MtC. Cela n'est possible qu'avec une part du pétrole dans les transports inférieure à un tiers de l'énergie finale du secteur. Or ce n'est pas tant la vivacité de la croissance des trafics qui singularise le transport mais plutôt l'absence de mouvement de substitution des énergies carbonées vers des énergies moins carbonées, comme cela est observé dans les autres secteurs.

Compte tenu du caractère a priori irremplaçable du pétrole d'ici 2050 dans certains secteurs du transport, comme le transport aérien, le transport maritime ou encore le

transport routier de marchandises, il sera nécessaire de conduire le changement, en priorité dans les transports terrestres de voyageurs.

Au vu des objectifs à atteindre, on ne pourra pas se contenter de ne mener qu'une seule politique à la fois. C'est donc bien toute une panoplie d'actions politiques qu'il faudra envisager simultanément, la question du coût de mise en œuvre de ces politiques étant mise de côté dans cette analyse.

Ainsi cinq champs d'actions politiques sont pour l'heure identifiés :

- la réduction des consommations unitaires des véhicules
- l'augmentation de la part des biocarburants
- le développement de motorisations sans émissions de CO₂
- les transferts modaux vers des modes propres, comme le rail ou les modes doux
- la maîtrise de la mobilité par des politiques d'aménagement du territoire et d'urbanisme

3.2.3. Les possibles répercussions d'un scénario facteur 4 sur la demande de transport : une étude de la DGEMP

(Pour plus de détails voir annexe 4)

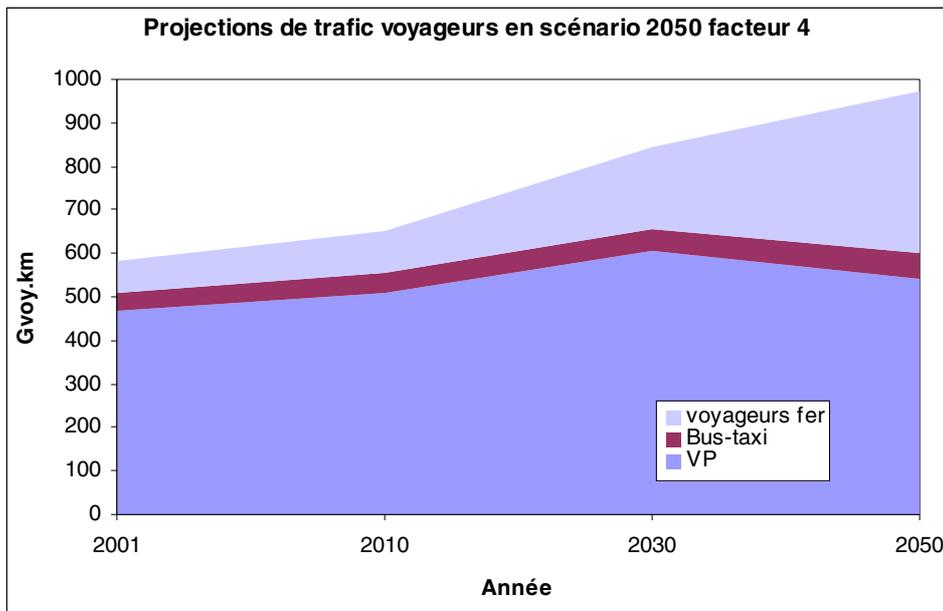
A l'instar de la MIES, la DGEMP a également mené des travaux de prospective à très long terme sur le facteur 4 [10], à l'aide du modèle technico-économique MEDEE et du modèle d'équilibre sectoriel POLES¹⁵.

Le scénario élaboré tient compte de politiques volontaristes relatives permettant de mettre en œuvre :

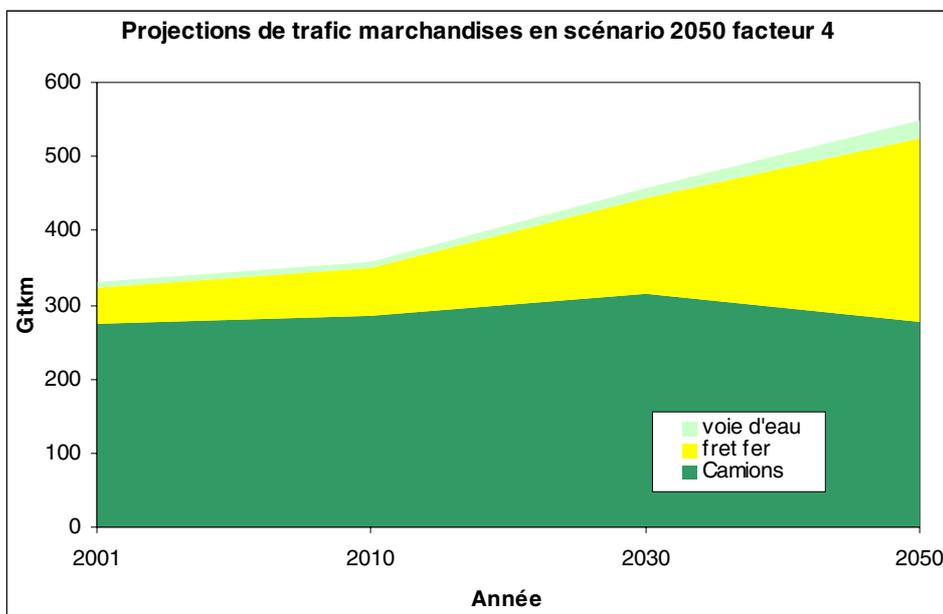
- ⇒ l'exploitation des potentiels énergétiques connus aujourd'hui,
- ⇒ l'utilisation des énergies non émettrices de CO₂,
- ⇒ l'utilisation croissante des biocarburants, des biogaz et de l'hydrogène,
- ⇒ la généralisation de la propulsion électrique
- ⇒ la réduction du ratio d'émission de carbone par véh.km de 140 gCO₂ en 2008 à 30 gCO₂ en 2050

Il correspond à un fort infléchissement de croissance de certains modes de transport au profit d'autres modes. En particulier il implique une forte réduction de la part de la voiture qui ne devrait représenter que 56% des transports terrestres de voyageurs, contre 80% en 2001. De même l'impact sur le transport routier de marchandises est élevé puisque celui-ci ne devrait représenter que 50% du transport de marchandises, contre 83% en 2001. C'est principalement le mode ferroviaire qui devrait bénéficier de ces reprints modaux, avec une forte incertitude sur sa capacité à absorber un tel surplus de trafic. Ces changements sont représentés dans les graphes ci-dessous.

¹⁵ POLES est un modèle de simulation du système énergétique mondial, aux horizons 2030 et 2050. C'est un modèle de simulation récurrente : la dynamique est donnée, à partir du point initial puis d'année en année, par les ajustements progressifs des variables d'offre, de demande et de prix.



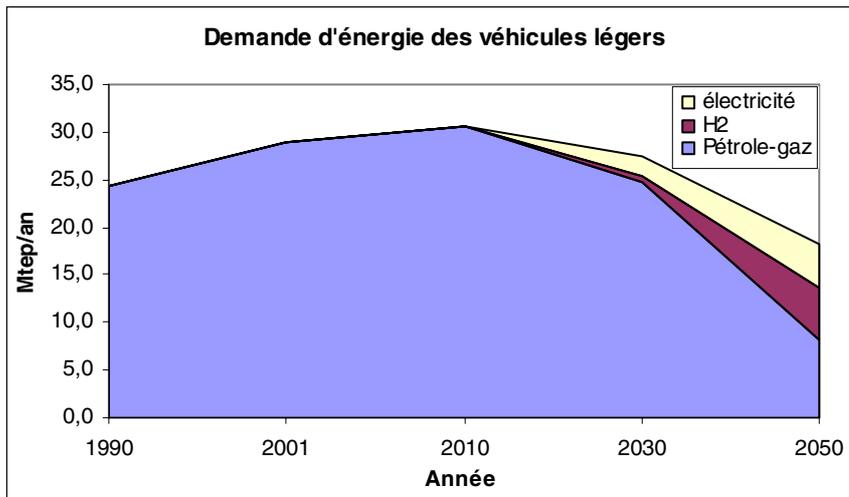
Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005



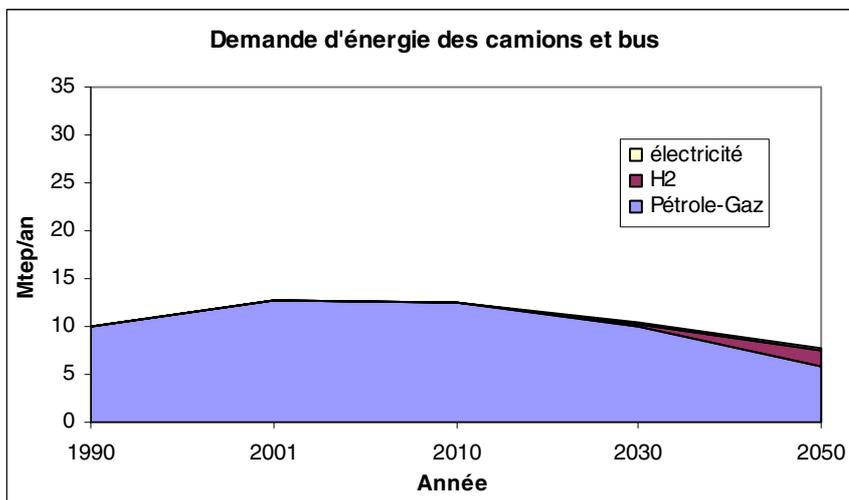
Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005

3.2.4. Les implications d'un scénario facteur 4 sur la consommation énergétique des véhicules

La demande énergétique diminue considérablement dans le scénario 2050 facteur 4 et la part des énergies « hydrogène » et « électricité » augmente considérablement, notamment dans le parc de véhicules particuliers.



Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005



Source : Etude pour une prospective énergétique concernant la France – DGEMP – février 2005

La projection à un horizon aussi lointain et des inversions de tendances aussi fortes impliquent d'aller au-delà de simples substitutions dans les technologies utilisées. Il s'agit d'envisager un changement de paradigme technologique, d'organisation spatiale, de comportements de consommation et de mobilité.

La déclinaison des objectifs ne peut se faire secteur par secteur, indépendamment des interactions mutuelles. La transposition à l'Ile-de-France d'un scénario facteur 4 devra par conséquent s'envisager dans une approche transversale.

4. Les évolutions technologiques des moteurs pour la propulsion des véhicules automobiles routiers.

L'annexe 5 examine les évolutions possibles des technologies de motorisation des véhicules automobiles routiers destinées à réduire leurs émissions de gaz carbonique (CO₂).

Cela recouvre donc à la fois les améliorations permettant d'accroître l'efficacité des moteurs conventionnels (c'est-à-dire les moteurs à combustion interne à mouvement alternatif fonctionnant au gazole ou à l'essence), les divers carburants alternatifs aux produits pétroliers pouvant être utilisés dans ces moteurs (GPL, gaz naturel, biocarburants, carburants de synthèse, hydrogène), les technologies de rupture (le moteur électrique alimenté par une pile à combustible¹⁶, le moteur électrique alimenté par des batteries à très hautes performances) et les technologies de transition (les divers véhicules hybrides¹⁷).

Cependant on rappelle que d'autres éléments interviennent dans la consommation d'énergie fossile et par suite dans les émissions de CO₂. Celui qui agit le plus est le poids du véhicule dont la tendance est fortement haussière : +30% en 10 ans pour une catégorie donnée¹⁸.

On rappelle également que les performances indiquées ne concerne que le groupe moto propulseur ; en particulier elles ne tiennent pas compte d'équipements de confort (comme la climatisation) qui accroissent sensiblement la consommation d'énergie.

Le tableau ci-après synthétise cette analyse, avec une estimation de la date de mise sur le marché des diverses innovations.

On résume ci-après la consistance des technologies non précédemment définies (D : moteur diesel ; E : moteur à essence)

- ⇒ « Downsizing » (D, E) : diminution de la cylindrée tout en maintenant les performances.
- ⇒ Injection directe (D, E) : injection directe du mélange air-carburant dans la chambre de combustion
- ⇒ Combustion stratifiée (E) : contrôle de l'injection visant à localiser un nuage riche en essence au voisinage de la bougie d'allumage tandis que le reste de la chambre est rempli d'air
- ⇒ Distribution variable (D, E) : l'objectif est d'obtenir un réglage optimal de la distribution du mélange air-carburant en fonction des conditions d'utilisation du moteur ; pour cela un calculateur électronique varie le moment d'ouverture et la levée des soupapes d'admission et d'échappement.
- ⇒ Hybride léger (D, E) : hybridation partielle (par exemple l'arrêt du moteur thermique au ralenti couplé avec la récupération de l'énergie de freinage)
- ⇒ Biocarburant (D, E) : carburant liquide ou gazeux fabriqué à partir des produits agricoles (colza, tournesol, maïs, soja, betterave, canne à sucre, blé, pomme de terre, etc)
- ⇒ Suralimentation par turbocompresseur (E) : récupération des gaz d'échappement pour actionner un compresseur qui injecte sous pression l'air d'admission

¹⁶ Pile à combustible : générateur d'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air via une réaction électrochimique (réaction inverse de l'électrolyse de l'eau)

¹⁷ véhicule hybride : véhicule possédant une motorisation mixte thermique/électrique. L'objectif recherché est de minimiser la consommation de carburant (et par suite de réduire les émissions de CO₂) en optimisant le fonctionnement de chacun des moteurs. Le moteur thermique est un moteur à combustion interne utilisant tous les carburants possibles pour ce genre de moteur (essence, gazole, gaz naturel, biocarburants, etc)

¹⁸ Les deux autres éléments sont l'aérodynamisme et le roulement pour lesquels les gains potentiels sont sensiblement plus faibles.

- ⇒ Diesel HCCI (D) : nouveau moteur diesel où la combustion est la plus homogène possible (on homogénéise le mélange air-carburant avant le déclenchement de la combustion)
- ⇒ Moteur CAI (E) ou moteur à auto-inflammation contrôlée. La bougie d'allumage disparaît ; l'auto-inflammation du mélange air-essence est provoquée par la présence (volontairement créée) de gaz chauds résiduels de la combustion précédente.
- ⇒ Carburant de synthèse (D, E) : carburants liquide classique (essence, gazole) fabriqué à partir d'autres ressources que le pétrole : gaz naturel (GTL), charbon (CTL), biomasse (BTL).

Période de mise sur le marché	Innovation technologique	Gain par rapport au moteur conventionnel essence actuel (injection indirecte, catalyse 3 voies)	
		En consommation d'énergie	En émission de CO ₂
Aujourd'hui	Downsizing (D)	30 à 35%	30 à 35%
	Injection directe (E)	10 à 15%	10 à 15%
	Combustion stratifiée (E)	10 à 15%	10 à 15%
	Distribution variable (E)	7 à 13%	7 à 13%
	Hybride type Prius (E)	30% ⁽¹⁾	30% ⁽¹⁾
	Biocarburants (D, E) incorporation 1%	nd	70% ⁽²⁾
2006-2010	« downsizing » via la suralimentation par turbocompresseur avec réduction de la cylindrée et injection directe(E)	18 à 30%	18 à 30%
	Hybrides légers (E)	10 à 15% ⁽¹⁾	10 à 15% ⁽¹⁾
	Hybrides légers (D)	30 à 40% ⁽¹⁾	30 à 40% ⁽¹⁾
	Moteur dédié au gaz naturel	nd	30 à 35%
	Biocarburants (D, E) incorporation 7%	nd	70% ⁽²⁾
2011-2015	Diesel HCCI (D)	35 à 40%	35 à 40%
	Distribution variable (D)	30 à 35%	30 à 35%
	Injection directe haute pression (E)	10 à 15%	10 à 15%
	CAI (E)	10 à 15%	10 à 15%
	Hybride total parallèle/série (E)	45% ⁽¹⁾	45% ⁽¹⁾
	Biocarburants (D, E) incorporation 10%	nd	70% ⁽²⁾
	(?) Carburants de synthèse GTL, CTL	nd	nd
2016-2020	Hybride total diesel (D)	50%	50%
	Hybride gaz naturel	nd	50 à 55%
	Hybride hydrogène	nd	nd
	(?) Carburant de synthèse BTL	nd	70% ⁽²⁾
Après 2020	Pile à combustible	20 à 50% ⁽³⁾	20 à 90% ⁽³⁾
	(?) Batteries électriques à très hautes performances	nd	100%

E : véhicules à essence

D : véhicules diesel

(1) : estimation en conduite urbaine

(2) : calcul fait du puits à la roue sur la seule partie de l'essence ou du gazole substituée par le biocarburant approprié

(3) : dépend du mode de fabrication et du système de transport à bord de l'hydrogène (la meilleure performance est liée à la production industrielle de l'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité d'origine nucléaire)

On attire l'attention du lecteur sur l'approximation à la fois des dates de mise sur le marché et sur les gains attendus en consommation et en émissions de CO₂.

Les dates de mise sur le marché dépendent en premier lieu des progrès technologiques. C'est le cas de la pile à combustible : la date retenue correspond à l'état d'avancement actuel des recherches. Une rupture technologique pourrait l'avancer ; à l'inverse le piétinement futur des résultats de recherche peut la retarder. On peut aussi conjecturer que « l'impossible » arrive, par exemple qu'après des décennies d'avancées graduelles dans le stockage à bord de l'électricité (les batteries) une percée majeure se produise. Dans ce cas le moteur tout électrique classique prendrait un essor non prévisible à ce jour et supplanterait vraisemblablement la pile à combustible.

En second lieu elles dépendent du niveau de prix du pétrole. C'est un facteur déterminant pour les carburants de synthèse GTL (gaz to liquid), CTL (coal to liquid) et surtout BTL (biomass to liquid) dont on doit également réduire drastiquement le coût de production. Les gains espérés pourraient également changer avec l'amélioration des technologies.

D'une manière générale plus la date probable de mise sur le marché est éloignée, plus les incertitudes sont élevées.

La propulsion des véhicules automobiles routiers dépendra majoritairement pendant encore longtemps du moteur à combustion interne, essentiellement pour deux raisons : d'une part parce que la solution technologique de rupture – le moteur électrique alimenté par une pile à combustible, voire par des batteries à très hautes performances – n'est pas au point techniquement et est très chère ; d'autre part parce que le renouvellement du parc automobile est lent. On rappelle que la pénétration naturelle d'une nouvelle technologie sur tous les véhicules neufs nécessite 15 ans, la pénétration sur tout le parc roulant au moins 25 ans ; on rappelle également que la combinaison des mesures d'accélération de la sortie de parc des véhicules anciens (nouvelle norme, contrôle technique et sortie des véhicules à partir de 15 ans d'âge) ne raccourcirait que de 7 ans le délai de pénétration totale du parc [4]

L'analyse précédente montre cependant que l'on peut améliorer sensiblement le rendement énergétique des moteurs conventionnels (diesel et à essence) ainsi que celui des moteurs non conventionnels à combustion interne (gaz naturel, hydrogène, hybrides).

Côté carburants on peut développer les biocarburants actuels (EMHV, ETBE, éthanol) dont l'intérêt est surtout le bilan CO₂ « du puits à la roue ». Toutefois il semble que l'on ne puisse guère dépasser l'objectif de 10% d'incorporation pour des raisons pratiques, notamment de conflit avec d'autres productions agricoles¹⁹. L'espoir viendrait plutôt des technologies BTL (carburants de synthèse à partir de la biomasse) dont le bilan CO₂ « du puits à la roue » est du même ordre que les biocarburants, à condition d'améliorer très sensiblement à la fois leur technique de fabrication et leur rentabilité économique.

Enfin, comme le montrent les scénarios « facteur 4 » déjà produits²⁰, la seule technologie ne suffira pas à atteindre dans le domaine des transports l'objectif 2050 souhaité par la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique, même en cas de succès de la pile à combustible. La rupture avec la dépendance pétrolière des transports routiers devra également se faire par le biais de modifications dans l'organisation urbaine, économique, sociale et les comportements.

¹⁹ Un calcul simple montre que si on souhaite faire fonctionner les transports terrestres non électriques actuels (consommant 44,4 ktep de produits pétroliers en 2002) avec les seuls biocarburants il faudrait y consacrer 1,5 à 2 fois la superficie des surfaces cultivables.

²⁰ Scénarios cherchant à respecter l'objectif de division par « quatre ou cinq » des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (Article 2 de la récente loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique). Voir par exemple les références [9] et [10].

5. La stratégie à suivre.

On a vu (§ 1) que les deux enjeux énergétiques des transports franciliens sont : le pic de production du pétrole et l'effet de serre additionnel d'origine anthropique. Fort heureusement ces deux enjeux sont convergents et conduisent à rechercher une diminution de la consommation pétrolière dans les transports franciliens et, plus généralement, de toute énergie dont le bilan global en émission de CO₂ n'est pas favorable (bilan en cycle de vie tenant compte des émissions à l'exploitation, à la production, à la distribution et à la consommation).

5.1. Le pic pétrolier est l'enjeu qui devrait se manifester en premier, à court ou moyen terme (entre 2010 et 2030). Pourtant ce n'est pas celui qui est le plus contraignant.

En effet, si les transports seront largement dépendants du pétrole pendant encore longtemps, le prix durablement élevé de ce dernier accélèrera les substitutions à cette énergie dans les secteurs où celles-ci sont plus faciles à mettre en œuvre (résidentiel, tertiaire, industrie, agriculture, production d'électricité d'appoint). Ceci pourra apporter un soulagement aux transports sans résoudre le problème à long terme. Par ailleurs, outre les énergies de substitution immédiatement disponibles (gaz naturel véhicule, biocarburants agricoles, véhicules électriques et hybrides), il sera possible de fabriquer des carburants de synthèse à partir du gaz et du charbon. Mais dans ce cas, avec les techniques existantes, le bilan global en émissions de CO₂ est pire que celui des carburants fossiles²¹. Comme on l'a vu au § 4 la solution satisfaisante pour l'effet de serre serait la fabrication de carburants de synthèse à partir de la biomasse (BTL), actuellement au stade de la recherche-développement et très coûteuse. Il ne faut pas oublier non plus que les experts prévoient un « plateau » de production mondiale du gaz naturel vers 2020-2030 ; ce plateau pourrait durer un demi-siècle si son exploitation est raisonnée avant de décliner plus rapidement que le pétrole.[6]²²

5.2. En fait c'est l'effet de serre additionnel d'origine anthropique qui est l'enjeu le plus contraignant, bien qu'il se situe dans une perspective de long terme (2050 et au-delà).

Pour bien faire sentir l'importance de cet enjeu on rappelle que l'objectif national « de facteur 4 » en 2050 (0,5 tC annuel/habitant) correspond, selon notre mode de consommation actuel, à²³ :

- ⇒ soit parcourir 13.000 km dans une voiture respectant la future norme de 140gCO₂/km (en se limitant aux seuls effets de serre créés par la consommation de carburant)
- ⇒ soit parcourir la même distance (13.000 km) en avion long courrier (un aller-retour Paris-New-York)

²¹ Les émissions de CO₂ à la consommation sont les mêmes qu'avec les carburants fossiles (73 g de CO₂ par MJ), mais les émissions amont (exploitation, production) sont supérieures pour le gaz (25 g de CO₂ par MJ) contre 5 à 10 dans le raffinage du pétrole), et très supérieure avec le charbon (160 g de CO₂ par MJ) [cf Cédric PHILIBERT, AIE « Transports, énergies et facteur 4 .» dans Territoires 2030 n° 2 (décembre 2005)

²² On rappelle que la production mondiale de gaz naturel croît nettement plus vite que celle du pétrole depuis longtemps (+129% entre 1973 et 2003, contre +34% pour le pétrole) et que les experts prévoient que cette tendance se poursuivra (+84% entre 2003 et 2030, contre +59% pour le pétrole) [Source : AIE « Key world energy statistics 2005. »]

²³ Lettre de six hauts fonctionnaires adressée à M. Christian de BOISSIEU, Président du Groupe « Facteur 4 », datée du 26 septembre 2005

- ⇒ soit consommer 700 litres de fioul domestique
- ⇒ soit chauffer au fioul pendant un an de 40 à 50 m² ou au gaz de 60 à 70 m²
- ⇒ soit consommer environ 150 g de viande de veau par jour ou 1kg de viande de porc

Ces données montrent l'ampleur du chemin à parcourir. Elles suggèrent que les seules évolutions technologiques (dont beaucoup sont encore inconnues) ne suffiront pas pour atteindre l'objectif souhaité et que l'on sera amené à repenser notre organisation collective (urbanisation, modes de vie et de consommation énergétique).

En particulier en ce qui concerne les transports on a vu (§ 4) que les transports routiers dépendront majoritairement pendant encore longtemps du moteur à combustion interne dont les divers carburants (conventionnels et alternatifs) produisent du CO₂ quand ils sont consommés, sans oublier que le pétrole est pratiquement irremplaçable à moyen terme (2030) dans les transports routiers de marchandises sur moyenne et longue distance et dans les transports aériens et maritimes. On a également vu que de grandes incertitudes demeurent sur la technologie de rupture : le moteur électrique alimenté par une pile à combustible, voire par des batteries à très hautes performances. De plus elle ne devrait être commercialisée massivement qu'à partir de 2020.

On sent bien que la seule technologie ne permettra pas d'atteindre facilement le « facteur 4 » en 2050. D'ailleurs tous les scénarios de prospective actuels (dits de « facteur 4 ») montrent en particulier que le secteur des transports doit rompre avec sa dépendance aux produits pétroliers (cf §3.2). La perspective d'un prix du pétrole (et du gaz naturel) durablement élevé renforce cette conclusion.

Tous les scénarios de l'étude de Pierre RADANNE réalisée pour le compte de la MIES montrent qu'en 2050 le niveau maximal d'émissions de CO₂ par les transports devrait être de 36,7 Mtonnes/an (10MtC/an) soit seulement 27% du niveau actuel (134 MtCO₂ en 2002). Ceci ne sera possible qu'avec une part du pétrole inférieure à 1/3 de l'énergie finale du secteur.

L'étude « facteur 4 » de la DGEMP aboutit à une forte réduction de la part de l'automobile dans les transports terrestres de voyageurs : 56% en 2050 contre 80% en 2001. De même pour les transports de marchandises la part de la route devrait passer de 83% en 2001 à seulement 50% en 2050. Les reports modaux devraient se faire principalement sur le fer qui connaîtrait alors des niveaux de trafic inégalés (+410% pour le trafic passager ; +390% pour le fret), avec une forte inconnue sur sa capacité à absorber un tel accroissement de trafic.

5.3. La stratégie à suivre : amorcer tout de suite le virage vers des transports franciliens sensiblement plus économes en énergie et surtout émettant globalement (en cycle de vie) peu (ou pas) de gaz à effet de serre.

Les considérations précédentes conduisent à une conclusion indéniable : dans le secteur des transports, et plus particulièrement dans les transports urbains et régionaux, il faut absolument rompre avec la tendance passée, c'est-à-dire avec la dépendance des produits pétroliers (y compris le gaz naturel) et plus généralement avec celle des carburants fortement émetteurs de CO₂ (cas des carburants de synthèse à partir du gaz naturel et surtout du charbon).

Ce virage est d'autant plus urgent à prendre que les transports cumulent les difficultés :

- ⇒ croissance continue, mais à un rythme incertain, de la mobilité

- ⇒ quasi totale dépendance du pétrole²⁴
- ⇒ impossibilité de capter les émissions de CO₂ du fait de leur caractère diffus
- ⇒ absence à ce jour de tout mouvement significatif de substitution des énergies carbonées vers des énergies non carbonées

Bien entendu il faut l'amorcer par le biais de la technologie et on a vu au § 4 que de multiples solutions existent ou sont en cours de recherche-développement. Les quatre axes à poursuivre sont :

- ⇒ le développement de véhicules plus efficaces énergétiquement
- ⇒ la substitution aux carburants conventionnels (essence et gazole) des sources d'énergie à plus faible contenu en carbone (par exemple gaz) ou ayant un bilan global de CO₂ favorable (par exemple biocarburants agricoles ou carburants de synthèse à partir de la biomasse)
- ⇒ l'accélération des recherches sur le véhicule électrique du futur (par exemple avec pile à combustible)
- ⇒ l'amélioration progressive de la gamme et de l'efficacité des véhicules hybrides (électricité – carburant thermique)

Ces objectifs techniques sont à poursuivre au niveau national, voire européen. On admet généralement que la seule technologie devrait permettre de diviser par deux à l'horizon 2050 les émissions nationales de CO₂ imputables aux transports.

Parallèlement, au niveau de l'Ile-de-France, il faut adopter dès que possible des mesures qui orientent les déplacements vers des solutions de transports plus économes en énergie et peu émettrices en CO₂.

Ces mesures recouvrent de nombreux domaines et correspondent à des objectifs variant du court terme au long terme : la politique d'urbanisme, la politique de transport, les normes, la réglementation, la fiscalité, la communication et l'éducation du public ? etc .

Ce sont surtout ces dernières actions que l'on examine dans le § 6 qui suit.

²⁴ Le véhicule automobile est tenu de transporter l'énergie dont il a besoin. Or le pétrole est de loin la forme d'énergie la plus appropriée tant en quantité d'énergie par unité de volume (et poids) qu'en facilité de manipulation et sécurité. On rappelle (voir annexe 5) pour faire 100 km avec une automobile de gamme moyenne diesel il faut 6 litres de gazole (5 kg) ou 60 litres de batterie (120 kg) , soit un rapport en poids de 1 à 24 malgré un rendement énergétique trois fois supérieur du moteur électrique.

6. Les actions possibles.

Les actions envisageables sont proposées par domaine d'application que sont l'aménagement, les infrastructures de transport, la régulation des transports etc.

Pour chacune des actions sont précisés :

- ⇒ La difficulté de mise en œuvre (hors financement et acceptabilité locale)
- ⇒ L'incertitude éventuelle des effets induits
- ⇒ L'horizon temporel des effets attendus, les actions à effet long-terme pouvant être engagées dès à présent

6.1. Aménagement

Difficulté de mise en œuvre	Incertitude des effets	Horizon court moyen ou long terme	
X		LT	Intégrer les politiques d'urbanisme et de transports de manière à limiter, d'une part les longueurs de déplacements, d'autre part la dépendance à l'égard de l'automobile. Rendre ces objectifs obligatoires dans les divers documents d'urbanisme (SDRIF, SCOT, PDU, PLU).
X		LT	Limiter l'étalement urbain et densifier l'agglomération parisienne (au sens INSEE) et les pôles secondaires : « la ville compacte ».
X	X	LT	Favoriser le développement urbain mixte (emplois, logements, services, équipements, etc) : « la ville à portée de main »
X	X	LT	Favoriser une organisation urbaine polycentrique avec un centre principal et des centres secondaires
X		LT	Urbaniser les zones en déclin (ex. friches industrielles) bien desservies par les transports en commun
		LT	Densifier l'habitat à proximité des gares et stations des réseaux ferrés (métro , RER, SNCF banlieue, tramway)
X		LT	Concentrer l'urbanisation et les activités urbaines en fonction des réseaux de transports collectifs (ferrés ou non) et de leurs besoins de desserte, par exemple grâce à des aides à la relocalisation
X		LT	Réserver en priorité aux activités du secteur tertiaire (bureaux, commerces :services publics, enseignement, équipements culturels) -qui ont de nombreux employés et/ou clients et visiteurs- les terrains de centre-ville desservis par tous les types de transports publics mais soumis à des problèmes de stationnement et de congestion du trafic.

6.2. Organisation des transports

Difficulté	Incertitude	Horizon	
X		CT	Instaurer rapidement une instance de coordination circulation-voirier-stationnement pour l'agglomération parisienne préfigurant une future autorité unique.

6.3. Infrastructures de transport

Difficulté	Incertitude	Horizon	
X		MLT	Améliorer l'efficacité des TC en banlieue en maillant les réseaux ferrés en Petite Couronne (rocares), en développant des TCSP de surface et en encourageant les réseaux de bassin en Grande Couronne.
X	X	MT	Résorber les grands goulots d'étranglement de la circulation par des investissements routiers
	X	MT	Favoriser la complémentarité de l'automobile et des transports en commun ; en particulier poursuivre le développement des parcs-relais aux gares et stations des réseaux ferrés là où les TC sont moins performants pour rabattre la clientèle sur ces gares.
X		MLT	Favoriser le développement des modes de transports de marchandises autres que routiers afin de limiter l'afflux de poids lourds (transports par rail, voie d'eau, oléoducs, transport combiné, autoroute ferroviaire)
		CMT	Faciliter la marche et l'usage de la bicyclette (développer les aménagements cyclables continus, élargir les trottoirs, aménager des trajets piétons)
	X	LT	Développer les liaisons ferrées rapides sur les trajets interurbains moyenne distance où le train est concurrentiel de l'avion
	X	MT	Rendre des aéroports capables d'accueillir des avions très gros porteurs

6.4. Exploitation des infrastructures de transport

Difficulté	Incertitude	Horizon	
	X	CT	Accroître l'efficacité du réseau routier par la régulation de la circulation (gestion dynamique des voies, limitation de la vitesse en cas de fort trafic)
		CMT	Accroître l'attrait des transports en commun : ⇒ développer l'offre, c'est-à-dire augmenter la fréquence, ouvrir certaines lignes la nuit, créer de nouvelles lignes ⇒ améliorer la qualité de service : la régularité, le confort dans les bus ou aux arrêts de bus, l'information des usagers sur l'offre, y compris en temps réel ⇒ améliorer la sécurité publique
		CT	Accorder la priorité aux taxis et aux transports en commun routiers en créant des sites propres ou couloirs bus dans les zones denses
		CT	Mettre en place des axes prioritaires pour les TC, (aménagement physiques, feux prioritaires, etc)
X	X	CMT	Avoir une politique de stationnement plus ciblée : ⇒ réduire l'offre de stationnement sur les lieux d'emplois bien desservis par les transports en commun ⇒ interdire le stationnement à certains endroits pour faciliter la circulation des TC ou la mise en place d'un TCSP ⇒ réduire le nombre de places de stationnement rotatif en centre-ville et en limiter la durée ⇒ favoriser les résidents pour le stationnement sur voirie ⇒ généraliser le stationnement payant ⇒ accroître le contrôle et le montant des amendes
X	X	MT	Coordonner les politiques de stationnement à l'échelle des bassins de déplacements
X	X	MT	Restreindre l'accès en voiture aux centres urbains par des mesures réglementaires comme des interdictions de circuler dans certains quartiers (zones interdites, zones à circulation limitée ou réservée), voire en instaurant éventuellement des péages urbains
		CT	Réduire les vitesses limites des VP et des poids lourds sur toutes les voies rapides franciliennes
X		MT	Instaurer une tarification modulée de l'usage des infrastructures pour les déplacements routiers VP et camions (par exemple péage d'infrastructure). La modulation peut s'entendre en fonction de l'heure d'utilisation, des paramètres d'émissions de polluants, du poids etc.
?		MT	Améliorer la gestion des trafics aériens (ATM - Air Traffic Management) afin d'optimiser les trajectoires des avions

6.5. Réglementation du transport et de ses prix

Difficulté	Incertitude	Horizon	
X ?		MT	Etablir une norme de puissance maximale à la tonne pour les véhicules neufs (équivalent à limiter la vitesse maximale des véhicules)
X		MT	Maintenir un signal prix des carburants fossiles en cohérence avec leur raréfaction à court terme (marché) et à moyen-long terme (pic de production mondiale du pétrole puis du gaz), notamment par l'intermédiaire d'une taxe carbone révisable périodiquement.
		CT	Avantager fiscalement les véhicules à faible émission de CO ₂ et pénaliser les autres (Par exemple abaisser le seuil de surtaxation de la carte grise des véhicules à fort taux d'émission de CO ₂ de 200gCO ₂ /km à 150gCO ₂ /km)
		MT	Accroître le montant des amendes de stationnement et en renforcer le contrôle

6.6. Développement d'une nouvelle génération de véhicules et de carburants

Difficulté	Incertitude	Horizon	
		LT	Favoriser les recherches sur la conception d'une voiture familiale consommant moins de 3,5 litres/100 km,
		LT	Accélérer les recherches sur le véhicule électrique et la pile à combustible,
		MLT	Accélérer les recherches sur les améliorations du moteur à combustion interne (« downsizing », moteurs HCCI et CAI, etc),
		MLT	Accélérer les recherches sur les carburants (essence, gazole, gaz naturel, hythane, hydrogène, biocarburants, carburants de synthèse notamment à partir de la biomasse)
		CMT	Favoriser l'équipement des flottes publiques d'autobus, véhicules utilitaires légers, poids lourds (y compris bennes à ordures) en véhicules peu (ou pas) émetteurs de CO ₂
		MT	Encourager le renouvellement des flottes de véhicules
		MT	Introduire des bus à motorisation électrique sur les lignes de transports en commun routiers les plus chargées (bus électriques)

			classiques, bus hybrides, trolleybus)
	X	CMT	Optimiser la conduite par développement des systèmes GPS (applications : guidage du conducteur, aide à la conduite, choix des itinéraires en temps réel en fonction du trafic)
	X	LT	Favoriser les recherches sur l'amélioration de l'aérodynamisme des avions
		MT	Augmenter les tailles des avions sur certaines liaisons

6.7. Incitation à des comportements vertueux.

Difficulté	Incertitude	Horizon	
		CMT	Sensibiliser les conducteurs aux économies d'énergie, dès l'auto-école en leur expliquant les règles de base (conduite souple plus économique, coupure du moteur lors d'arrêts prolongés, utilisation raisonnable de la climatisation, entretien régulier du véhicule (réglage de la carburation, gonflage des pneus))
		CMT	Former à l'environnement (et à l'énergie) les divers acteurs du transport et fournir une aide pédagogique aux collectivités locales
		CMT	Informers les franciliens sur les enjeux énergétiques des transports et organiser un débat public et contradictoire
		CMT	Inciter à changer les comportements en informant le public sur les conséquences des divers comportements et introduire à l'école une formation sur les économies d'énergie et le respect de l'environnement
		CMT	Faire participer le public dès les débuts à l'élaboration des projets et plans d'action afin de favoriser son acceptation lors de leur réalisation
X		CMT	Favoriser le covoiturage (accorder la priorité ou créer des voies réservées et des stationnements réservés aux véhicules avec plus de 2 occupants, créer un système de bourse au covoiturage, développer l'auto-stop payant)
X		CMT	Favoriser le développement de l'utilisation partagée de l'automobile (véhicules en «multipropriété », location de courte durée, taxi multiservice, etc)
	X	CMT	Inciter les automobilistes à préférer les véhicules les plus sobres

6.8. Organisation de la société

Difficulté	Incertitude	Horizon	
	X	MT	Développer les télécommunications et téléservices, afin de réduire les déplacements
X	X	MT	Développer le télétravail sous ses diverses formes, à temps plein ou partiel : travail à domicile, chez un client, dans un espace dédié proche du domicile de l'employé (« bureaux de voisinage »), etc.
X	X	MT	Revoir les horaires de travail (par exemple la semaine de quatre jours à associer avec le télétravail partiel)
		MT	Encourager financièrement les employeurs à élaborer et mettre en œuvre des plans de mobilité réduisant l'usage de la voiture particulière par leurs salariés.

6.9. En cas de crise

En cas de crise, il serait nécessaire de prendre des mesures d'urgence, pouvant être mises en œuvre rapidement, destinées à répondre ponctuellement à une situation de crise du pétrole, mais généralement peu souhaitables sur le long terme en raison de leur impact fort sur l'équilibre économique de la société.

On rappelle qu'il existe un « Plan ressources hydrocarbures » (PRH) national, déclinable au niveau départemental. Ce plan est activé en relation avec la Profession (sociétés pétrolières, organismes et organisations professionnelles concernées) qui garde la responsabilité et la direction des opérations d'approvisionnement, de raffinage, de stockage, de transport et de distribution. L'Etat lui fixe l'objectif prioritaire d'assurer les flux minima nécessaires aux usagers prioritaires désignés par l'Administration.

Cependant la Profession peut être amenée à faire appel à l'aide des pouvoirs publics dès qu'elle n'est plus en mesure d'assurer les missions prioritaires qui lui ont été confiées (Ex : protection des points sensibles, escortes, injonctions ou réquisitions, etc.).

Les usagers prioritaires sont « les acteurs administratifs et économiques dont dépendent la continuité de l'action gouvernementale et de l'information ainsi que la satisfaction des besoins vitaux de la population. » (Justice, Défense, Santé, Police, Pompiers, etc). Les besoins des prioritaires doivent être limités aux nécessités absolues de service (tous les véhicules d'un organisme prioritaire ne sont pas systématiquement prioritaires). On estime que ces besoins minimaux en produits pétroliers représentent de 5 à 10% du total des distributions selon les régions.

En outre « une attention particulière sera portée sur les besoins supplémentaires des opérateurs (transporteurs...) dont dépendent les approvisionnements "sensibles" de la population tels que les vivres, les médicaments, etc., compte tenu des achats de précaution effectués par la population, notamment en début de la crise. »

A titre d'exemple, les actions d'urgence à court terme suivantes pourraient être appliquées dans le domaine des transports :

- Application stricte des limitations de vitesse
- Application stricte des règles de stationnement
- Contrôle de la pression des pneumatiques
- Encadrement du prix et des taxes sur les carburants
- Réduction des vitesses limites
- Interdiction de circuler selon la période et / ou l'immatriculation
- Limitation des activités aériennes sportives ou de tourisme
- Réservation de stationnements pour les véhicules partagés
- Mise en œuvre de plans de circulation urbains et suburbains
- Incitation à l'arrêt des moteurs lors des arrêts prolongés
- Fixation du volume maximum distribué en stations-service
- Fixation du volume maximum distribué en stations-service
- Interdiction de vente de carburants en emballages
- Définition de règles de distribution en fonction de l'immatriculation
- Limitation des horaires d'ouverture des stations-service
- Rationnement du carburant aux usagers
- Rationnement des livraisons de carburants aux gros clients spécifiques

Elles pourraient être complétées par des actions à moyen terme comme :

- Aménagements des horaires de travail
- Incitation à utiliser les transports en commun
- Interdiction de stationner pour faciliter la circulation des transports en commun
- Fermeture périodique des stationnements urbains
- Interdiction de dépasser des limites géographiques
- Optimisation des tournées de livraison

Bibliographie

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, « Key world energy statistics », 2005, Page 44, disponible sur le site www.iea.org. (consulté le 21/03/2006).
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, « CO₂ from fuel combustion – fact sheet », 2005, disponible sur le site www.iea.org. (consulté le 21/03/2006).
- [3] AUZANNEAU Matthieu et SERINA Guillaume, « Pétrole. La panne sèche ? », Le Monde, 1^{er} octobre 2005
- [4] MORCHEOINE, Alain, « Les transports au XXIème siècle. Rencontre internationale de prospective du Sénat », 8 avril 2004.
- [5] RENAULT, Dossier sur les émissions polluantes et gaz à effet de serre.
- [6] ACADEMIE DES TECHNOLOGIES, « Prospective sur l'énergie au XXIème siècle », décembre 2004.
- [7] OPECST - Assemblée nationale- Sénat, « Rapport sur l'évaluation de l'ampleur des changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100 », 13 février 2002.
- [8] DATAR, « Le défi climato-énergétique du territoire », Territoires 2030 n°2, décembre 2005 (Dominique DRON).
- [9] RADANNE, Pierre, « La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 », MIES, juin 2004.
- [10] ENERDATA, DGEMP, « Etude pour une prospective énergétique concernant la France. Rapport final », 1^{er} février 2005

Annexes

Annexe 1

Les consommations énergétiques finales en Ile-de-France. Évolution 1990-2002. Comparaison avec les consommations énergétiques finales de la France métropolitaine.

Annexe 2

Fiche de lecture
Impact des politiques climatiques sur le prix du carbone et les marchés de l'énergie

Annexe 3

Fiche de lecture
« La division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 ». Pierre Radanne. MIES, mars 2004.

Annexe 4

Fiche de lecture
« Étude pour une prospective énergétique concernant la France ». ENERDATA-DGEMP, février 2005.

Annexe 5

Les nouvelles technologies énergétiques pour la propulsion des véhicules automobiles routiers destinées à réduire leurs émissions de gaz carbonique (CO₂).

Annexe 1

Les consommations énergétiques finales en Ile-de-France. Évolution 1990-2002. Comparaison avec les consommations énergétiques finales de la France métropolitaine.

Les consommations énergétiques finales en Ile-de-France, en 1990

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France par secteur d'activité et forme d'énergie hors chauffage urbain (en Ktep). Année 1990.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En Ktep	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Autres (5)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	1 430	1 681	1 850		329	5 290
Tertiaire	1 679	945	2 054			4 678
Transports aériens		2 967				2 967
Transports régionaux	231	5 270				5 501
Industrie	831	428	1 066	144	125	2 594
BTP	42		8			50
Agriculture	8	82	9			99
Total par forme d'énergie	4 221	11 373	4 987	144	454	21 179

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France par secteur d'activité et forme d'énergie hors chauffage urbain (en %). Année 1990.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Autres (5)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	6,8%	7,9%	8,7%	0,0%	1,6%	25,0%
Tertiaire	7,9%	4,5%	9,7%	0,0%	0,0%	22,1%
Transports aériens	0,0%	14,0%	0,0%	0,0%	0,0%	14,0%
Transports régionaux	1,1%	24,9%	0,0%	0,0%	0,0%	26,0%
Industrie	3,9%	2,0%	5,0%	0,7%	0,6%	12,2%
BTP	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%
Agriculture	0,0%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%
Total par forme d'énergie	19,9%	53,7%	23,5%	0,7%	2,1%	100,0%

(1) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 46% Résidentiel ; 54% Tertiaire

(2) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 64% Résidentiel ; 36% Tertiaire

(3) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 47,4% Résidentiel ; 52,6% Tertiaire

(4) Combustibles minéraux et solides (houille, lignite, coke de houille)

(5) Bois, charbon, achat de vapeur (industrie)

Les consommations énergétiques finales en Ile-de-France, en 2002

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France par secteur d'activité et forme d'énergie (en Ktep). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En Ktep	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	2 017	907	3 316		614	250	7 104
Tertiaire	2 186	789	1 907		335		5 217
Transports aériens		5 109					5 109
Transports régionaux	304	5 216					5 520
Industrie	568	86	1 097	34		102	1 887
BTP (7)	125		6				131
Agriculture	6	73	11				90
Total par forme d'énergie	5 206	12 180	6 337	34	949	352	25 058

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France par secteur d'activité et forme d'énergie (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	8,0%	3,6%	13,2%		2,5%	1,0%	28,4%
Tertiaire	8,7%	3,1%	7,6%		1,3%		20,8%
Transports aériens		20,4%					20,4%
Transports régionaux	1,2%	20,8%					22,0%
Industrie	2,3%	0,3%	4,4%	0,1%		0,4%	7,5%
BTP (7)	0,5%		0,0%				0,5%
Agriculture	0,0%	0,3%	0,0%				0,4%
Total par forme d'énergie	20,8%	48,6%	25,3%	0,1%	3,8%	1,4%	100,0%

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France. Part de chaque forme d'énergie pour un secteur donné (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	28,4%	12,8%	46,7%		8,6%	3,5%	100,0%
Tertiaire	41,9%	15,1%	36,6%		6,4%		100,0%
Transports aériens		100,0%					100,0%
Transports régionaux	5,5%	94,5%					100,0%
Industrie	30,1%	4,6%	58,1%	1,8%		5,4%	100,0%
BTP (7)	95,4%		4,6%				100,0%
Agriculture	6,7%	81,1%	12,2%				100,0%
Total par forme d'énergie	20,8%	48,6%	25,3%	0,1%	3,8%	1,4%	100,0%

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France. Part de chaque secteur pour une forme d'énergie donnée (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	38,7%	7,4%	52,3%		64,7%	71,0%	28,4%
Tertiaire	42,0%	6,5%	30,1%		35,3%		20,8%
Transports aériens		41,9%					20,4%
Transports régionaux	5,8%	42,8%					22,0%
Industrie	10,9%	0,7%	17,3%	100,0%		29,0%	7,5%
BTP (7)	2,4%		0,1%				0,5%
Agriculture	0,1%	0,6%	0,2%				0,4%
Total par forme d'énergie	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

- (1) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 48% Résidentiel ; 52% Tertiaire
 (2) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 53,5% Résidentiel ; 46,5% Tertiaire
 (3) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 63,5% Résidentiel ; 36,5% Tertiaire
 (4) Combustibles minéraux et solides (houille, lignite, coke de houille)
 (5) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 64,7% Résidentiel ; 35,3% Tertiaire
 (6) Bois, charbon, achat de vapeur (industrie)
 (7) Extrapolation de la tendance 1997-1999 (données 2002 non disponibles)

Les consommations énergétiques finales en France métropolitaine, en 2002.

Consommation d'énergie finale en France métropolitaine par secteur d'activité et forme d'énergie (en Ktep). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En Ktep	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	13 020	10 678	12 608		1 382	7 000	44 688
Tertiaire	8 680	4 598	6 624		511		20 413
Transports aériens		6 292					6 292
Transports terrestres	926	43 398					44 324
Industrie	11 193	4 405	14 951	7 128		2 891	40 568
BTP (7)	431		66				497
Agriculture	240	2 420	395				3 055
Total par forme d'énergie	34 490	71 791	34 644	7 128	1 893	9 891	159 837

Consommation d'énergie finale en France métropolitaine par secteur d'activité et forme d'énergie (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	8,1%	6,7%	7,9%		0,9%	4,4%	28,0%
Tertiaire	5,4%	2,9%	4,1%		0,3%		12,8%
Transports aériens		3,9%					3,9%
Transports régionaux	0,6%	27,2%					27,7%
Industrie	7,0%	2,8%	9,4%	4,5%		1,8%	25,4%
BTP (7)	0,3%		0,0%				0,3%
Agriculture	0,2%	1,5%	0,2%				1,9%
Total par forme d'énergie	21,6%	44,9%	21,7%	4,5%	1,2%	6,2%	100,0%

Consommation d'énergie finale en France métropolitaine. Part de chaque forme d'énergie pour un secteur donné (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	29,1%	23,9%	28,2%		3,1%	15,7%	100,0%
Tertiaire	42,5%	22,5%	32,4%		2,5%		100,0%
Transports aériens		100,0%					100,0%
Transports régionaux	2,1%	97,9%					100,0%
Industrie	27,6%	10,9%	36,9%	17,6%		7,1%	100,0%
BTP (7)	86,7%		13,3%				100,0%
Agriculture	7,9%	79,2%	12,9%				100,0%
Total par forme d'énergie	21,6%	44,9%	21,7%	4,5%	1,2%	6,2%	100,0%

Consommation d'énergie finale en France métropolitaine. Part de chaque secteur pour une forme d'énergie donnée (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité (1)	Produits pétroliers (2)	Gaz (3)	CMS (4)	Chauffage urbain (5)	Autres (6)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	37,8%	14,9%	36,4%		73,0%	70,8%	28,0%
Tertiaire	25,2%	6,4%	19,1%		27,0%		12,8%
Transports aériens		8,8%					3,9%
Transports régionaux	2,7%	60,5%					27,7%
Industrie	32,5%	6,1%	43,2%	100,0%		29,2%	25,4%
BTP (7)	1,2%		0,2%				0,3%
Agriculture	0,7%	3,4%	1,1%				1,9%
Total par forme d'énergie	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

(1) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 60% Résidentiel ; 40% Tertiaire

(2) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 69,9% Résidentiel ; 30,1% Tertiaire

(3) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 65,6% Résidentiel ; 34,4% Tertiaire

(4) Combustibles minéraux et solides (houille, lignite, coke de houille)

(5) Répartition entre Résidentiel et Tertiaire : 73% Résidentiel ; 27% Tertiaire

(6) Bois, charbon, achat de vapeur (industrie)

(7) Extrapolation de la tendance 1997-1999 (données 2002 non disponibles)

Comparaison des consommations énergétiques finales de l'Ile-de-France avec celles de la France métropolitaine, en 2002

Part de l'Ile-de-France dans la consommation d'énergie finale de la France métropolitaine par secteur d'activité et forme d'énergie (en %). Année 2002.

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

En %	Electricité	Produits pétroliers	Gaz	CMS	Chauffage urbain	Autres (1)	Total par secteur d'activité
Résidentiel	15%	8%	26%		44%	4%	16%
Tertiaire	25%	17%	29%		66%		26%
Transports aériens		81%					81%
Transports terrestres	33%	12%					12%
Industrie	5%	2%	7%	0,5%		4%	5%
BTP	29%		9%				26%
Agriculture	3%	3%	3%				3%
Total par forme d'énergie	15%	17%	18%	0,5%	50%	4%	16%

(1) Bois, charbon, achat de vapeur (industrie)

Exemple 1 : le secteur résidentiel d'Ile-de-France consomme 15% de l'électricité du secteur résidentiel national

Exemple 2 : le secteur tertiaire d'Ile-de-France consomme 25% de l'électricité du secteur tertiaire national

Exemple 3 : les transports terrestres d'Ile-de-France consomment 12% des produits pétroliers des transports terrestres nationaux

Exemple 4 : globalement l'Ile-de-France consomme 16% de l'énergie finale nationale (en incluant l'aérien)

Evolution des consommations énergétiques de l'Ile-de-France et de la France entre 1990 et 2002

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France par secteur d'activité et forme d'énergie hors chauffage urbain.

Evolution 1990-2002 (%)

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

	Electricité	Produits pétroliers	Gaz	CMS	Autres	Total par secteur d'activité
Résidentiel	41%	-46%	79%		-24%	23%
Tertiaire	30%	-17%	-7%			4%
Transports aériens		72%				72%
Transports régionaux	32%	-1%				0%
Industrie	-32%	-80%	3%	-76%	-18%	-27%
BTP	198%		-25%			162%
Agriculture	-25%	-11%	22%			-9%
Total par forme d'énergie	23%	7%	27%	-76%	-22%	14%

Consommation d'énergie finale en Ile-de-France par secteur d'activité et forme d'énergie hors chauffage urbain.

Evolution moyenne annuelle 1990-2002 (% , croissance géométrique)

Source : DGEMP- Observatoire de l'énergie

	Electricité	Produits pétroliers	Gaz	CMS	Autres	Total par secteur d'activité
Résidentiel	2,9%	-5,0%	5,0%		-2,3%	1,7%
Tertiaire	2,2%	-1,5%	-0,6%			0,4%
Transports aériens		4,6%				4,6%
Transports régionaux	2,3%	-0,1%				0,0%
Industrie	-3,1%	-12,5%	0,2%	-11,3%	-1,7%	-2,6%
BTP	9,5%		-2,4%			8,4%
Agriculture	-2,4%	-1,0%	1,7%			-0,8%
Total par forme d'énergie	1,8%	0,6%	2,0%	-11,3%	-2,1%	1,1%

Intensité énergétique. Consommation per capita - Ile de France et France 1990-2002

Source : INSEE, DGEMP

	1990	2002	Evolution
PIB RIF en volume (G€ 2004)	346,29	443,97	
PIB National en volume (G€ 2004)	1 256,99	1 598,21	
Conso RIF (ktep)	21179	24109	
Conso France (ktep)	142590	159837	
Intensité énergétique RIF (tep/M€) [1]	61	54	-11%
Intensité énergétique France (tep/M€) [2]	113	100	-12%
Ratio [1]/[2]	54%	54%	
Conso RIF transports terrestres (ktep)	5501	5520	
Conso France transports terrestres (ktep)	37251	44324	
Intensité énergétique RIF transports (tep/M€) [3]	16	12	-22%
Intensité énergétique France transports (tep/M€) [4]	30	28	-6%
Ratio [3]/[4]	54%	45%	
Population RIF (millions d'hab.)	10,66	11,205	
Population France (millions d'hab.)	56,615	59,856	
Conso RIF par habitant (tep/hab) [5]	1,99	2,15	8%
Conso France par habitant (tep/hab) [6]	2,52	2,67	6%
Ratio [5]/[6]	79%	81%	
Conso transports RIF par habitant (tep/hab) [7]	0,52	0,49	-5%
Conso transports France par habitant (tep/hab) [8]	0,66	0,74	13%
Ratio [7]/[8]	78%	67%	

Nota : en 1990 le chauffage urbain n'est pas comptabilisé (non disponible).

Annexe 2

Fiche de lecture Impact des politiques climatiques sur le prix du carbone et les marchés de l'énergie

Odile Blanchard, Patrick Criqui, Alban Kitous, Silvana Mima – LEPII Grenoble

http://web.upmf-grenoble.fr/iepe/textes/OB-PC-SM-AK_RevueEcoFi-2005.pdf

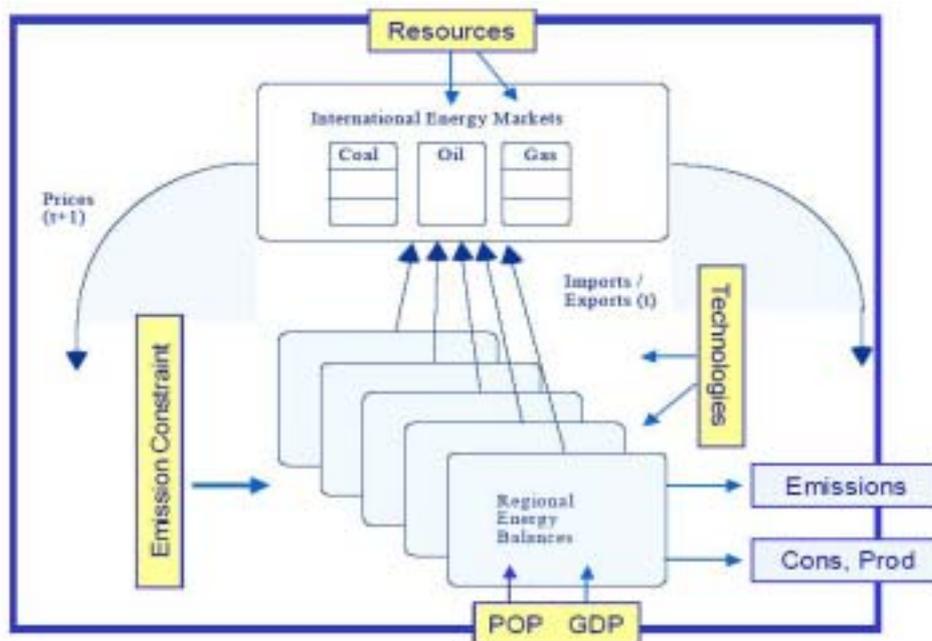
Article à paraître dans la revue financière

La raréfaction du pétrole conduit dans un scénario tendanciel à une hausse et continue de son prix et à un transfert de la demande vers des énergies de substitution devenues plus attractives. Ces énergies de substitution, comme le charbon, sont tout autant émettrices de gaz à effet de serre et on ne peut compter sur la raréfaction des ressources pour réduire suffisamment les émissions de GES.

En revanche, les politiques climatiques peuvent agir sur les prix de l'énergie au niveau mondial et favoriser l'émergence des énergies les moins émettrices tout en stabilisant la demande en pétrole ainsi que son prix.

1- Le modèle POLES

Le LEPII a développé POLES un outil de prospective sur l'énergie à l'horizon 2050. Ce modèle est construit sur une approche géographique (46 régions), prend comme données d'entrée des hypothèses de population, de croissance économique, de contraintes d'émissions et de contraintes de ressources pour le pétrole et le gaz. En sortie, ce modèle fournit des données de consommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre.



Les données d'entrée et de sortie sont fournies pour chacune des zones géographiques, ce qui permet d'envisager des politiques climatiques adaptées aux différents contextes.

2- Prospective 2050 : un scénario tendanciel

2.1- Données de cadrage

Ce modèle fournit un scénario tendanciel 2050 qui va au delà d'un simple prolongement des tendances actuelles. En particulier la croissance démographique mondiale est contrastée avec des zones géographiques en déclin sur 2030-2050, la croissance économique de la Chine marque également une inflexion due au vieillissement de sa population. Au final la population mondiale passe de 6,1 milliards d'habitants en 2001 à 8,9 milliards en 2050 (soit +45%).

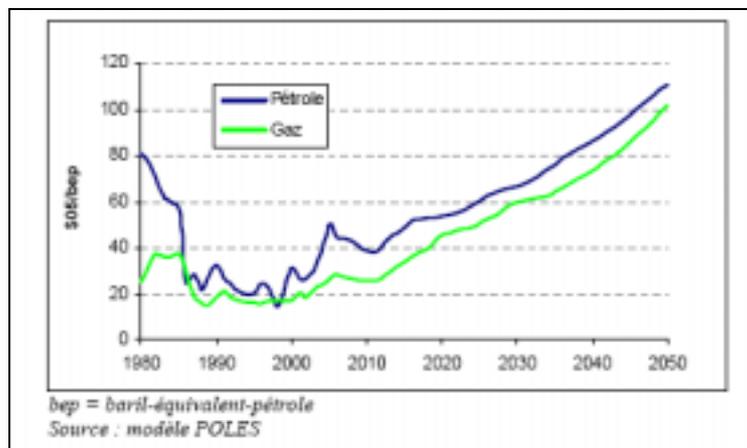
Ce scénario aboutit à une **multiplication par quatre du PIB et une multiplication par deux de la demande d'énergie**. Dans ce scénario, l'intensité énergétique est donc réduite de moitié du fait d'une part de changements structurels dans l'économie et d'autre part à la hausse des prix de l'énergie.

2.2- Energies fossiles

Dans ce scénario, **les énergies fossiles représentent 70% de la consommation énergétique** contre 80% aujourd'hui soit une forte croissance de leur consommation en valeur absolue (+95%).

La production de pétrole conventionnel augmente jusqu'en 2030, se stabilise à un niveau supérieur de 20% à la production actuelle et décline à partir de 2050. La croissance de la consommation mondiale, ralentie par des prix élevés, provient de la montée des huiles non conventionnelles. On constate le retour du charbon dont la consommation égale celle du pétrole en 2050 (contre les 2/3 aujourd'hui).

Le prix du pétrole croît continûment et celui du gaz suit la même courbe avec un décalage temporel. **Le prix du pétrole en 2050 est de 100\$ par baril.**



2.3- Impact climatique

Sur cette période, **les émissions de CO₂ augmentent de plus de 90%** mais légèrement moins vite que la consommation de combustibles fossiles du fait notamment de la montée des énergies renouvelables et du nucléaire ainsi que de la capture du CO₂. Les pays industrialisés qui représentent 50% des émissions en 2010 ne représentent plus que 30% en 2030.

Ces niveaux d'émission conduisent à des concentrations de GES dans l'atmosphère de l'ordre de 900 à 1000 ppm soit plus du double du niveau à ne pas dépasser (450 ppmv) pour limiter à 2°C l'augmentation de la température moyenne du globe.

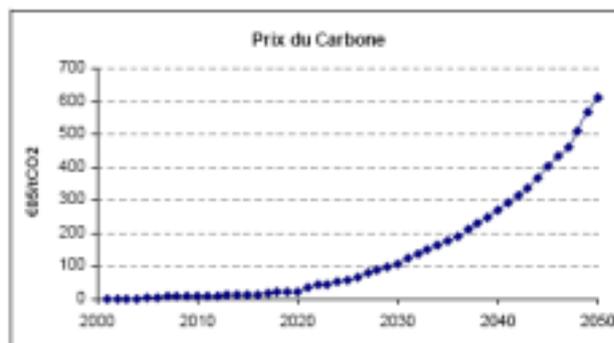
3- Scénario de forte contrainte carbone pour stabiliser les concentrations

Le modèle POLES permet d'intégrer un paramètre de contrainte carbone qui regroupe l'ensemble des mécanismes de régulation des émissions pouvant être envisagés : quotas, taxe carbone, politiques, mesures réglementaires... Elle est résumée au moyen d'un unique indicateur : la valeur de la tonne de CO₂.

Cette valeur-carbone est intégrée dans le scénarios tendanciel pour refléter artificiellement les politiques de réduction des émissions. Le montant de cette valeur peut ainsi différer selon les zones géographiques du modèle et varier au cours du temps.

3.1- Profil de la valeur-carbone

Le scénario de forte contrainte a déterminé le montant de la valeur-carbone à utiliser pour chacune des zones géographiques ainsi que leur évolution pour arriver à l'objectif de plafonnement des émissions mondiales en 2020, de retour au niveau actuel en 2030 et de les diviser par deux en 2050 pour arriver à stabiliser leur concentration à 450 ppmv. Cette valeur est représentative de l'intensité des efforts à fournir et ne saurait se réduire à un mécanisme unique de quotas ou de taxation du carbone.



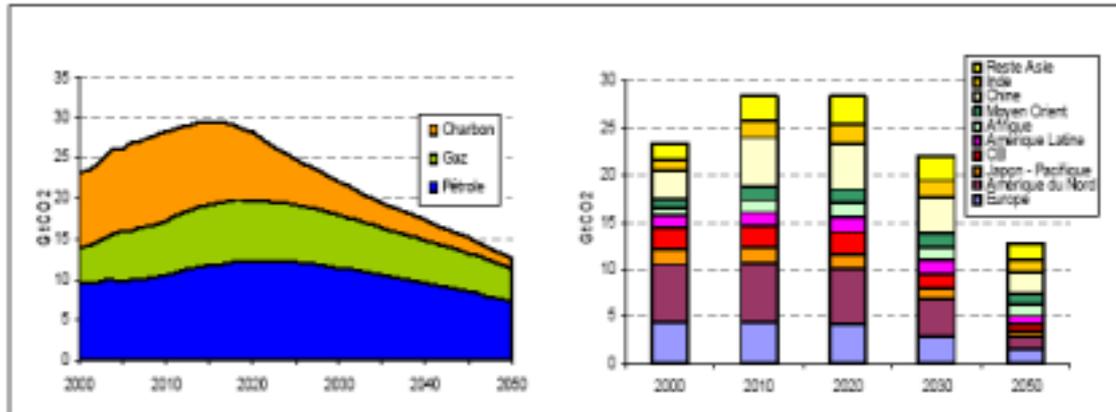
Source : modèle POLES

3.2- Enseignements du modèle

1. On aboutit ainsi à des **un niveau très élevé de la valeur-carbone à l'horizon 2050 (600\$/t CO₂)** ce qui illustre l'ampleur des politiques à mettre en œuvre.
2. La forte croissance de la valeur-carbone à partir de 2020 est nécessaire pour aboutir à une réduction rapide des émissions après le plafond. Ce résultat n'est pas atteint avec la même valeur finale atteinte avec une croissance linéaire.
3. Il n'y a pas de « technologie-limite » qui deviendrait attractive à partir d'un certain seuil de la valeur carbone et qui entraînerait des réductions massives d'émissions. **Les solutions technologiques basses émissions sont toutes rentables mais leur développement est contraint dans tous les cas.**

3.3- Impacts sur les émissions

Par construction, on arrive au profil d'émissions attendu et à une **division par deux à l'horizon 2050**. Il est intéressant de voir que les **émissions des pays industrialisés ont été divisées par 4 et que celle des pays en voie de développement ont été réduites de 10%**.



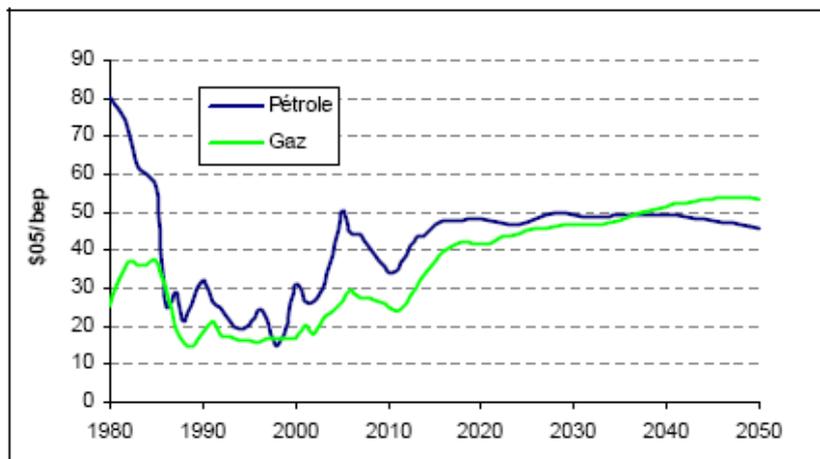
GtCO₂ = milliards de tonnes-équivalent-gaz carbonique
Source : modèle POLES

3.4- Consommation énergétique – prix de l'énergie

Dans ce scénario, les consommations croissent jusqu'à 2020 et se stabilisent ensuite à un niveau environ 30% supérieur à celui des années 2000. Pour les pays industrialisés, le niveau de stabilisation est inférieur à celui de 2001, pour les pays en voie de développement, la consommation énergétique aura été multipliée par deux.

Les énergies fossiles ne représentent plus que 50% de la consommation énergétique totale (70% dans le scénario tendanciel).

L'évolution des prix du pétrole et du gaz suit la même évolution que le scénario tendanciel jusqu'en 2020 mais ensuite, sous l'influence de la taxe carbone qui diminue la demande, la production diminue **stabilisant ainsi les prix à un niveau de 50\$ environ** soit deux fois moins que pour le scénario tendanciel.



bep=baril-équivalent-pétrole
Source : modèle POLES

Cet infléchissement de prix ne se retrouve pas dans les prix finaux payés par les utilisateurs du fait des niveaux élevés de taxe carbone, mais allège la facture énergétique des pays consommateurs.

(100\$ par tonne de CO₂ représente un coût additionnel de 43\$ par baril de pétrole car 1 tonne de pétrole correspond à 7,2 barils et sa combustion émet environ 3,1 tonnes de CO₂)

Le scénario « facteur 4 – stabilisation » peut être ainsi qualifié de « gagnant-gagnant » : les politiques climatiques arrivent à réduire les émissions de GES et à stabiliser les prix du pétrole sur le marché des matières premières.

A contrario, le scénario tendanciel peut être qualifié de « perdant-perdant » : la raréfaction du pétrole ne limite que faiblement la croissance de la consommation d'énergie et les impacts climatiques des énergies de substitution sont très importants.

Annexe 3

Fiche de lecture

« La division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 ». Pierre Radanne. MIES, mars 2004.

Dans cette fiche on s'attache aux seuls aspects de l'étude concernant le secteur des transports.

1- Objectif

D'ici 2050 diviser par quatre les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) en France (par rapport aux émissions actuelles) qualifié de « facteur 4 ».

Concrètement cela implique de ramener les émissions de 105 MtC²⁵ en 2000 à 32 MtC²⁶ en 2050, au lieu de 146 MtC si rien n'est fait²⁷.

Rem : cet objectif se situe dans un objectif mondial de plafonnement de la concentration de CO₂ à 450 ppmv en 2050.

2- Situation actuelle (année 2000)

Les consommations d'énergie se sont traduites par l'émission de 105 MtC²⁸ se décomposant comme suit :

Décomposition par secteur d'activité (année 2000)

Secteur d'activité	Emissions (MtC)	Répartition (%)
Transports	42	40%
Industrie	25	24%
Résidentiel	23	22%
Tertiaire	12	11%
Agriculture	3	3%
Total	105	100%

Décomposition par source d'énergie (année 2000)

Source d'énergie	Emissions (MtC)	Répartition (%)
Pétrole	65	62%
Gaz	20	19%
Electricité	11	10%
Charbon	9	9%
Total	105	100%

Deux constats importants concernent le secteur transports :

- ils émettent 40% du CO₂ issu des consommations d'énergie

²⁵ MtC : millions de tonnes carbone ; pour obtenir les tonnes de CO₂ il faut multiplier par 3,67 (rapport des masses molaires) : 1 MtC = 3,67 MtCO₂

²⁶ Le ratio n'est pas exactement de 4 (mais de 3,6) car l'auteur s'est calé sur l'objectif mondial de 0,5 MtC par habitant en 2050.

²⁷ C'est à dire une division par 4,6 de la tendance à l'horizon 2050.

²⁸ Soit 385 MtCO₂

- ils dépendent essentiellement du pétrole (à 95%) qui émet 62% du CO₂ issu des consommations d'énergie²⁹

A eux seuls les transports émettent actuellement 1,3 fois plus de CO₂ que le niveau souhaitable en 2050 selon l'engagement du gouvernement.

On voit donc que **le respect du « facteur 4 » implique inévitablement que les transports réduisent leur dépendance pétrolière.**

3- Méthodologie.

Présentation de 8 scénarios.

3.1- Trois scénarios ne respectant pas l'objectif « facteur 4 »

- « **sans Eco** » ou tendanciel : aucun progrès d'économie d'énergie
- « **Eco** » : amélioration du niveau d'efficacité énergétique mais sans modification des parts de marché entre énergies par rapport au scénario « sans Eco »
- « **Offre** » : la seule réponse à la contrainte climatique est la modification de l'offre

3.2- Cinq scénarios respectant l'objectif « facteur 4 »

- « **F4 nucléaire** » : développement accru du nucléaire et pénétration de l'électricité dans tous les usages y compris les transports
- « **RcogN** » : équilibrage au recours au nucléaire par le développement de la cogénération et des renouvelables
- « **F4 Séquest** » : place importante aux combustibles fossiles couplée à une séquestration du CO₂
- « **F4 sN+S** » : sortie du nucléaire avec recours à la séquestration du CO₂
- « **F4 H₂** » : mise en place d'une filière hydrogène alimentée par des centrales nucléaires

Tous les scénarios assurent strictement le même volume d'énergie utile dans chaque catégorie d'usage et décrivent donc bien la même France de 2050.

Ils sont basés sur une évolution prudente du progrès technologique (des performances énergétiques n'excédant pas de plus de 20% les meilleures actuelles).

Dans la suite de cette fiche on se focalisera sur les résultats et recommandations concernant les transports.

4- Hypothèses communes à tous les scénarios.

- Population de la France en 2050 : 64 millions d'habitants
- Croissance du PIB : +1,7% par an (multiplication par 2,3 en 50 ans)
- Il en découlerait un accroissement de la demande d'énergie utile de +60%³⁰
- Accroissement du parc de logements : +1% par an
- Accroissement des surfaces du secteur tertiaire : +2% par an
- Accroissement de la mobilité : +1,7% par an en moyenne ; dans le détail : +1,4% par an pour le transport routier des personnes, +1,5% par an pour celui des marchandises, +1,1% par an pour le rail et les transports collectifs et +2,5% par an pour l'aérien.

²⁹ NDLR : en 2004 les transports (hors soutes maritimes mais incluant les transports aériens) représentaient 32% de la consommation finale d'énergie nationale et 57% de la consommation finale de produits pétroliers (Source : DGEMP « L'énergie en France. Repères ». Edition 2005)

³⁰ NDLR : d'après les tableaux pages 8 et 10 on aurait plutôt une croissance de +80% ; passage de 86 Mtep en 2000 à 156 Mtep en 2050

5- Evolution du secteur transports.

5.1- Les transports cumulent les difficultés.

- croissance forte mais grande incertitude sur l'importance de la croissance de la mobilité (l'hypothèse de +1,7% par an suppose une croissance soutenue de la mobilité d'ici 2020 puis un décrochage de celle-ci par rapport à la croissance économique).
- quasi totale dépendance du pétrole
- caractère diffus des consommations d'énergie et des émissions (d'où impossibilité de captage du CO₂ émis)
- à ce jour absence de tout mouvement de substitution des énergies carbonées vers des énergies non carbonées.

5.2- La nécessité de rompre avec la dépendance pétrolière.

On a déjà vu (§ 2) qu'à eux seuls les transports émettent actuellement 1,3 fois plus de CO₂ que le niveau souhaitable en 2050 selon l'engagement du gouvernement.

De plus le scénario tendanciel montre qu'à l'horizon 2050 les transports représentent les 4/5 de l'accroissement des émissions.

Tous les scénarios de facteur 4 impliquent un niveau maximal d'émissions des transports de l'ordre de 10 MtC en 2050 (contre 42 en 2000) ; ceci n'est possible qu'avec une part du pétrole inférieure à 1/3 de l'énergie finale du secteur.

« Or le pétrole est irremplaçable dans les transports aérien et maritime et (dans) le transport routier de marchandises sur moyenne et longue distance » (sic)

Par suite il est indispensable de changer la motorisation des véhicules légers (voitures, camionnettes) avec passage aux biocarburants, à l'électricité voire à l'hydrogène

5.3- Les cinq politiques à appliquer simultanément.

La condition précédente implique l'application simultanée de cinq politiques :

1°) Une forte réduction des consommations unitaires des véhicules

L'enjeu : descendre en dessous des 3l/100km.

En particulier réduire la vitesse maximale réelle des véhicules neufs

2°) Une contribution croissante des biocarburants (y compris la biomasse).

Atteindre de 8 à 14 Mtep de biocarburants (NDLR : 0,4 Mtep produits en 2005)

3°) Le développement de motorisations sans émissions de CO₂ par le véhicule.

En l'absence de rupture technologique sur les batteries électriques il faut développer les deux technologies suivantes :

- le véhicule hybride
- l'hydrogène produit par le nucléaire, les énergies renouvelables ou des combustibles fossiles avec récupération du CO₂ à la production. Il faut éliminer l'hydrogène produit à bord des véhicules par réformage à partir d'un combustible fossile (car production de CO₂ non captable)

4°) Des transferts modaux notamment vers le rail.

Pas de données chiffrées sur ces transferts dans le texte de l'étude.

5°) Une maîtrise de la mobilité par des politiques d'aménagement du territoire et d'urbanisme.

Les scénarios de facteur 4 supposent une réduction de la mobilité de 20%.

6- Les enseignements robustes issus de l'étude.

On a retenu l'ensemble des conclusions de l'étude même quand les transports ne sont pas concernés.

6.1- Les « points durs » (les usages pour lesquels l'utilisation de combustibles fossiles est la moins substituables ; ils seront donc prioritaires dans l'allocation du potentiel d'émission du facteur 4) :

- le transport sur longue distance (surtout le transport aérien)
- les usages où seule une énergie aisément stockable permet une adaptation immédiate aux variations de la demande (par exemple la production électrique de pointe)

6.2- Les « interdits » (les évolutions incompatibles avec une division par 4 des émissions de CO₂) :

- utilisation massive de combustibles fossiles pour la production d'énergie thermique dans l'industrie, l'habitat et le tertiaire
- une production électrique à flamme même par turbine à gaz
- un secteur transport dépendant du pétrole

Une seule de ces options retenues fait inévitablement échouer les scénarios facteur 4.

6.3- Les « incontournables » (les évolutions obligatoires) :

- une efficacité énergétique maximale dans tous les secteurs
- une amélioration des comportements notamment dans les transports où une mutation profonde des habitudes est nécessaire
- la réorganisation de la politique des transports (aucun scénario de facteur 4 n'est envisageable sans une très forte réduction des consommations pétrolières, essentiellement au profit des transports électriques)
- le développement des énergies renouvelables

6.4- Les « ruptures technologiques » (les sauts technologiques majeurs qui élargissent les marges de manœuvre)

- la technologie au service des comportements (celle qui contribue à la sobriété énergétique : capteurs, informatique, modulation du chauffage en fonction de l'occupation, mise en veille performante, « stop and start », etc.)
- le stockage de l'électricité (les progrès dans le stockage massif de l'électricité seraient les bienvenus et faciliteraient l'intégration dans le réseau électrique des productions discontinues d'électricité produite à partir des énergies renouvelables)
- la séquestration du carbone (applicable aux sources de production massives même si cela nécessite un transport du CO₂ par gazoduc)
- le passage à l'économie de l'hydrogène (cependant la réalisation des deux ruptures précédentes en réduira l'intérêt ; l'avenir est ouvert)

6.5- Des « espaces de choix » réels (différentes stratégies qui conduisent à des résultats équivalents).

- le choix entre les énergies non carbonées, nucléaire ou renouvelables (à noter que le nucléaire accapare près de 100% des débats mais ne contribue qu'à 17% de la consommation finale nationale)
- les limites de l'attrait du gaz naturel par rapport aux autres combustibles fossiles (« L'amour immodéré dont il fait l'objet pourrait finir très mal » : hausse du prix du gaz naturel, infrastructures de transport de ce gaz beaucoup plus longues et coûteuses à réaliser que celles du pétrole)

Annexe 4

Fiche de lecture

« Étude pour une prospective énergétique concernant la France ». ENERDATA-DGEMP, février 2005.

Cette étude présente 2 scénarios :

⇒ un Scénario tendanciel 2030

⇒ un Scénario facteur 4 2050

1- Scénario tendanciel 2030

1.1- Hypothèses du scénario

Cadrage macro-économique	Evolution prévue	Source
PIB	2.3% par an	Travaux du groupe DIVA
Population 2030	63.9 millions	INSEE
Ménages 2030	29.5 millions	INSEE
Pop active 2030	26.5 millions	INSEE
Prix du pétrole 2030	30 \$ / baril	DGEMP

Hypothèses transport	2001	2030	Evolution prévue 2001 - 2030	Source
Taux d'occupation des VP	1.86	1.59	-15%	METL
Parc VP	32.7	40.4	+24%	METL
Indice de consommation/véh-essence (=1 en 1990)	0.97	0.73	-25%	ADEME
Indice de consommation/véh-gazole (=1 en 1990)	0.95	0.71	-25%	ADEME
Trafic routier TC (Gvoy*km)	45	49	+9%	METL
Trafic fer TC (Gvoy*km)	72	128	+78%	METL
Trafic air TC (Mvoy)	99	374	+278%	METL
Trafic routier fret (Gtkm)	269	447	+66%	METL
Trafic fer fret (Gtkm)	50	82	+64%	METL
Trafic fluvial fret (Gtkm)	7	10	+43%	METL

Commentaire :

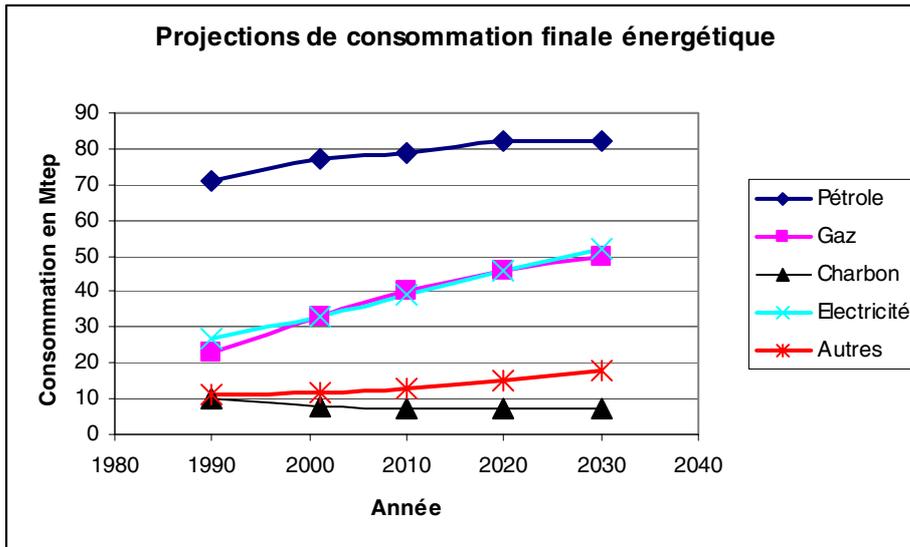
⇒ Hypothèse de croissance du PIB élevée : correspond à l'hypothèse haute du SES entre 2002 et 2025. L'hypothèse moyenne du SES est de 1.9% entre 2002 et 2025.

⇒ Prix du baril : le modèle POLES fournit des résultats à plus de 35\$ le baril

1.2- Résultats

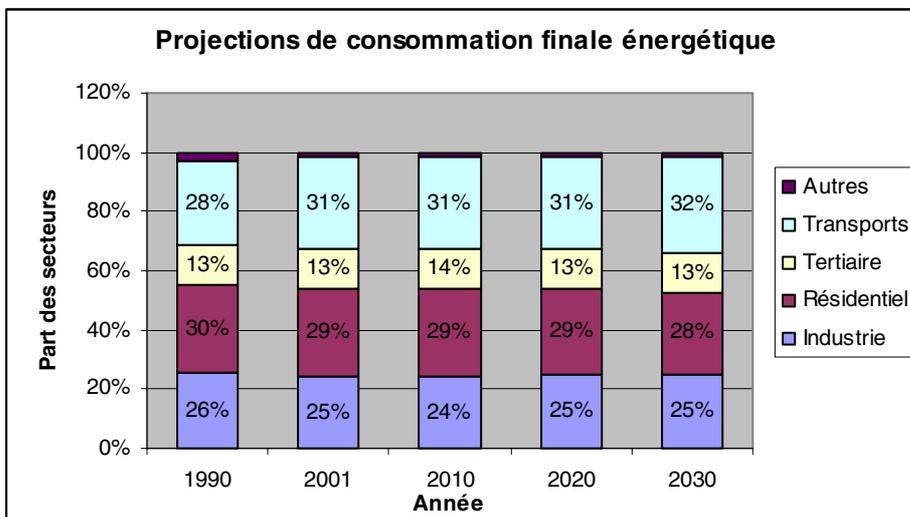
- Consommation finale énergétique

Consommation finale énergétique	2001	2030	Evolution prévue
Pétrole	77	82	+6,5% (+0.2%/an)
Gaz	33	50	+51% (+1.4%/an)
Charbon	8	7	-12,5% (-0.4%/an)
Electricité	33	52	+58% (+1.6%/an)
Autres	12	18	+50% (+1.4%/an)

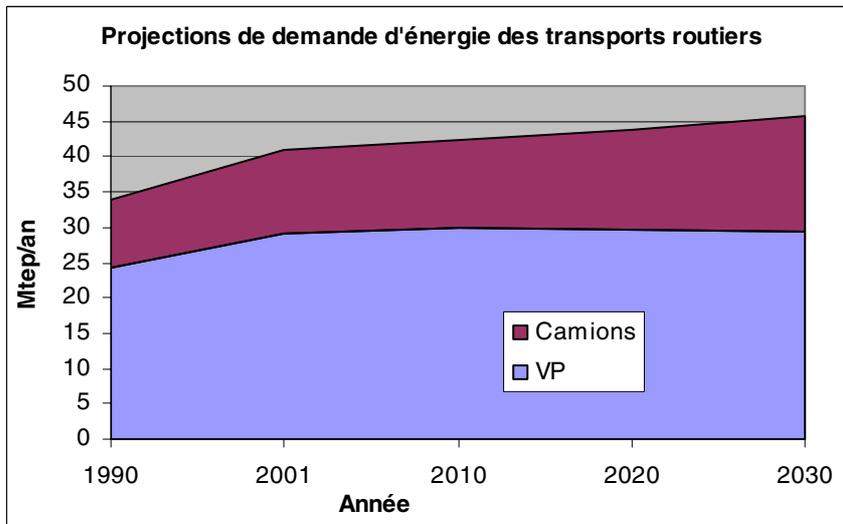


- Consommation finale énergétique par secteurs

Consommation finale énergétique par secteurs	2001	2030	Evolution prévue
Industrie	40	52	+30% (+0.9%/an)
Résidentiel	48	58	+21% (+0.7%/an)
Tertiaire	22	28	+27% (+0.8%/an)
Transports	50	67	+34% (+1.0%/an)
Autres	3	3	+0% (+0%/an)



- Résultats transports



- Commentaires

- ⇒ Infléchissement de la croissance de la demande énergétique
- ⇒ Part du transport assez stable en % mais croissance de 0.9% par an en moyenne sur la période
- ⇒ Indicateurs de consommation énergétique du transport :
 - Le parc automobile
 - La part de marché des différents types de carburant
 - La distance annuelle moyenne de parcours des véhicules
 - La consommation des véhicules

2- Extrapolation à 2050 du scénario tendanciel 2030**2.1- Hypothèses du scénario**

Indicateur	Evolution prévue	Source
PIB	2.3% par an	Travaux du groupe DIVA
Population 2050	Projections INSEE 2050	INSEE

2.2- Résultats

- Consommation finale d'énergie (Mtep)

	Industrie	Transport	Résidentiel-tertiaire-Agri	Total	Industrie	Transport	Résidentiel-tertiaire-Agri
2001	50	49	68	167	30%	29%	41%
2010	55	57	73	185	30%	31%	39%
2030	75	74	82	231	32%	32%	35%
2050	69	76	76	221	31%	34%	34%

La consommation d'énergie diminue entre 2030 et 2050, sauf pour les transports

- Consommation finale de pétrole (Mtep)

	Industrie	Transport	Résidentiel- tertiaire-Agri	Total
2001	7	48	19	74
2010	6	55	17	78
2030	7	71	13	91
2050	8	71	9	88

La consommation de pétrole diminue entre 2001 et 2050, uniquement pour le secteur « résidentiel-tertiaire-agri ».

3- Scénario facteur 4 2050

Il s'agit d'un scénario souhaitable où les émissions de CO2 sont réduites d'un facteur 4 par rapport à 1990.

Pour passer de l'univers actuel à cet univers souhaitable, nombre de ruptures seront nécessaires.

3.1- Limites d'interprétation du modèle.

- Valeur du carbone calculée par le modèle

C'est une valeur « duale » qui traduit autant la contrainte imposée au modèle que les lacunes de connaissance.

- Équilibre offre-demande produit par le modèle

Il dépend fortement de la valeur du carbone calculée pour le scénario, de la connaissance des coûts des technologies et de l'organisation du système énergétique en place.

3.2- Hypothèses du modèle

Hypothèses liées aux limites de nos connaissances
Valeur du carbone calculée par le modèle : C'est une valeur « duale » qui traduit autant la contrainte imposée au modèle que les lacunes de connaissance.
Pas de prise en compte des rétroactions du facteur 4 sur l'économie
Exploitation des potentiels énergétiques tels qu'ils sont connus aujourd'hui
Priorité aux énergies non émettrices de CO2
Les gaz ont des quantités croissantes de biogaz et H2
Hypothèses transports
Baisse de l'élasticité de trafic de 1.1 à 0.9
Retour du trafic routier au niveau 2010
Usage de la VP : 12000 km/an pour 1 pers., 21000 km/an pour 2 pers. Etc.
TC voyageurs : croissance de la mobilité de 2000 km/an/pers en 2001 à 6700 km/an/pers. En 2050
Hypothèses technologiques
Généralisation propulsion électrique
Électrique : 40% - PAC H2 : 30% - hybrides 30% (essence ou gazole avec 10% de biocarburants)
Réduction du ratio d'émission de carbone par véh.km de 140 gCO2 en 2008 à 30 gCO2 en 2050
Hypothèses macroéconomiques
PIB : croissance de 1.9% par an entre 2000 et 2050
Population mondiale 2050 : 8.9 milliards hab (0.4%/an entre 2040 et 2050)

3.3- Principes du modèle

Une 1^{ère} projection 2050, conçue sans contrainte d'émission, entraîne l'apparition d'un pic pétrolier vers 2040 pour le pétrole « conventionnel ».

Puis une 2^{ème} projection 2050, assortie d'une contrainte d'émission, entraîne une réduction significative de la consommation de pétrole qui redevient alors abondant. Son prix évolue dans une plage comprise entre 20\$ et 30\$ le baril.

3.4- Résultats

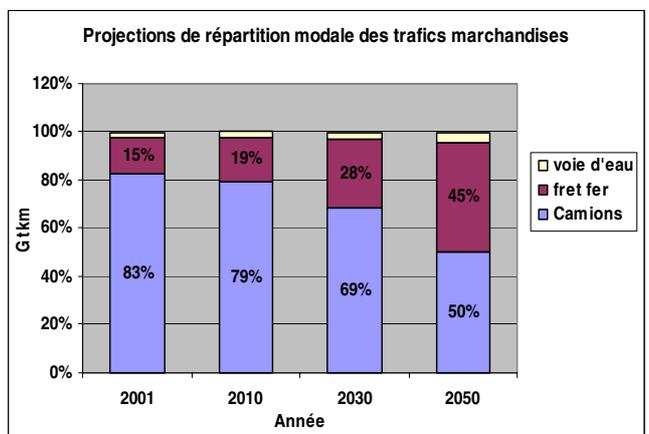
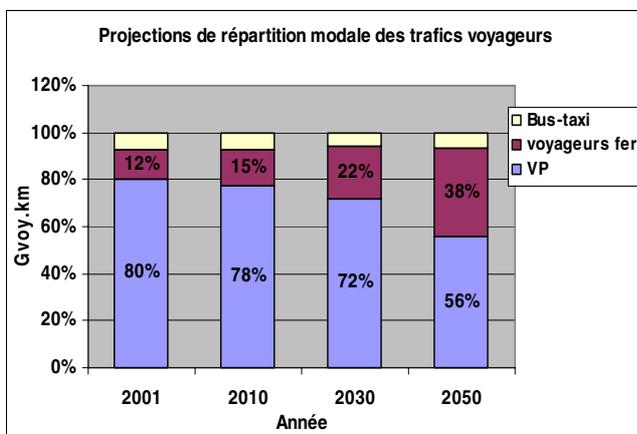
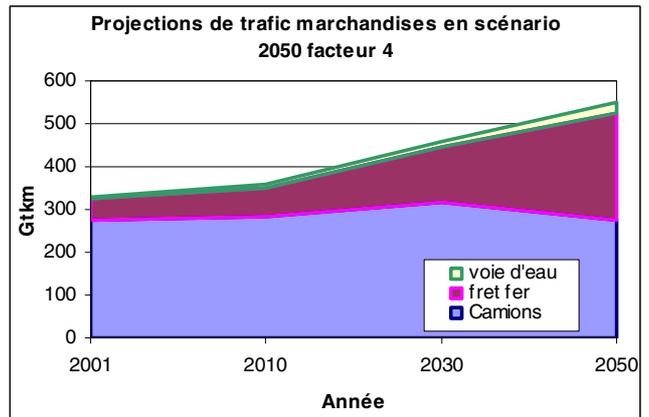
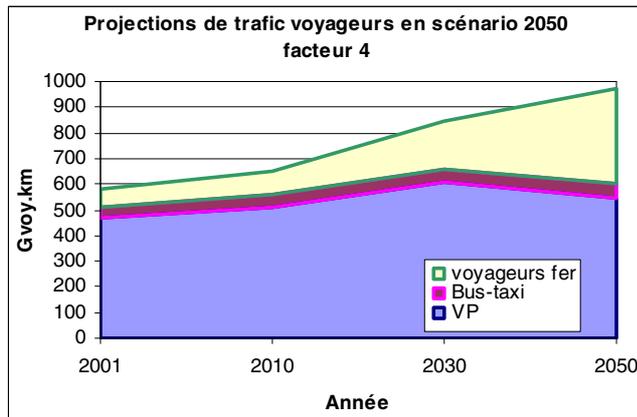
- Consommation énergétique globale

Consommation finale énergétique par secteurs	2050 tendanciel		2050 facteur 4	
	2030	2050	2030	2050
Industrie	75	69	50	44
Résidentiel-tertiaire-agri	82	76	81	74
Transports	74	76	66	70
Total	231	221	196	186

L'industrie, plus que le transport, marque des réductions d'émissions importantes.

- Résultats transports

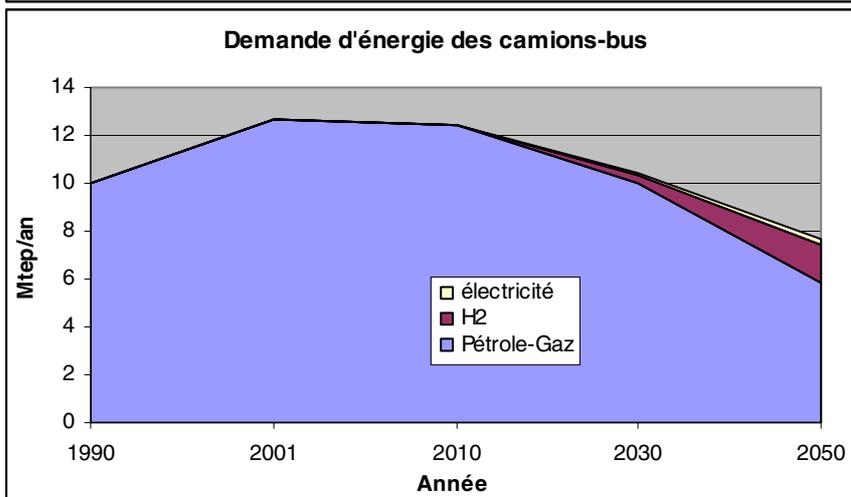
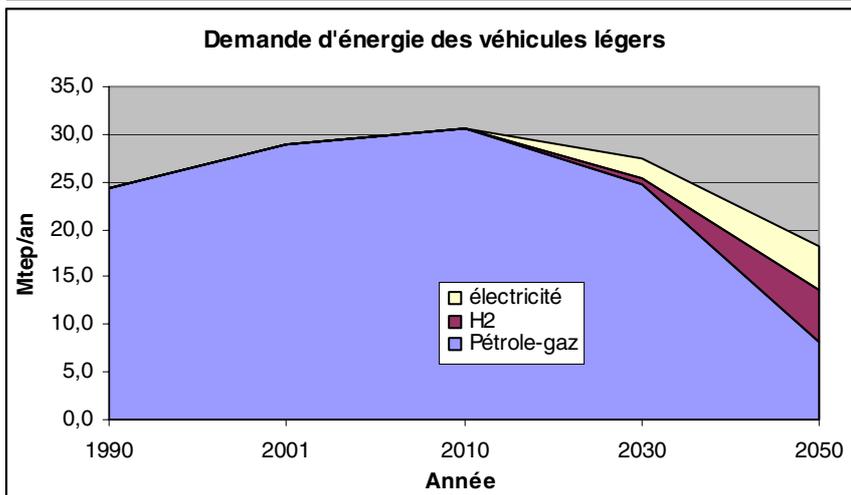
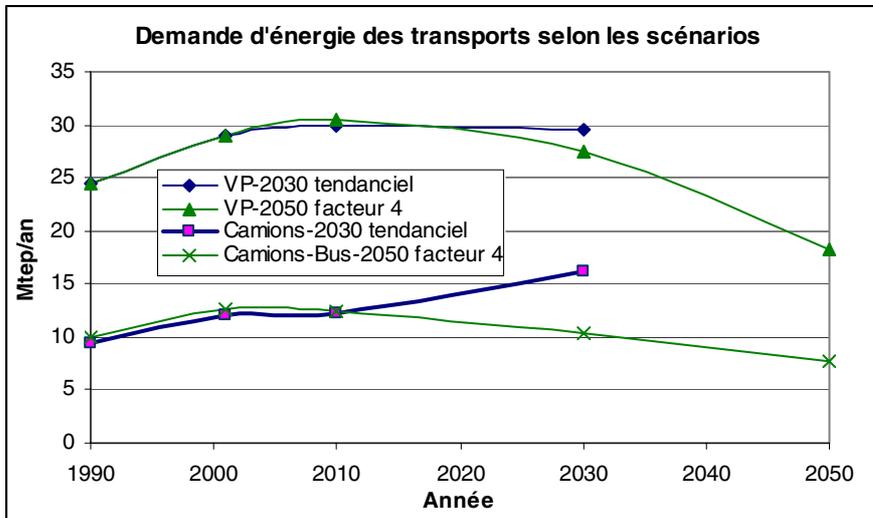
Projections de trafic à 2050



Concernant les voyageurs, la part de la VP s'infléchit nettement au profit du transport ferroviaire (TGV). De même pour les marchandises, la part des camions s'infléchit au profit du fret ferroviaire. La part de la route diminue donc au profit du fer.

- Projections de demande énergétique des transports

La demande énergétique diminue considérablement dans le scénario 2050 facteur 4 et la part des énergies « hydrogène » et « électricité » augmente considérablement, notamment dans le parc de véhicules particuliers.



Annexe 5

Les nouvelles technologies énergétiques pour la propulsion des véhicules automobiles routiers destinées à réduire leurs émissions de gaz carbonique (CO₂).

Ce document est réalisé essentiellement à partir des travaux de l'IFP³¹ (institut français du pétrole) mais l'auteur (Louis Servant) reste totalement responsable de l'interprétation qu'il en fait.

On se concentre sur les émissions de gaz carbonique (CO₂) ; on ne mentionne donc pas les technologies uniquement destinées à la réduction de la pollution atmosphérique locale (par exemple les systèmes de post-traitement comme les filtres à particules, pièges à NO_x, réduction catalytique sélective, etc).

Par ailleurs on se limite aux technologies du groupe moto-propulseur.

Cependant on rappelle que d'autres éléments interviennent dans la consommation d'énergie fossile et par suite dans les émissions de CO₂. Celui qui agit le plus est le poids du véhicule dont la tendance est fortement haussière : +30% en 10 ans pour une catégorie donnée³².

On rappelle également que les performances indiquées ne concerne que le groupe moto propulseur ; en particulier elles ne tiennent pas compte d'équipements de confort (comme la climatisation) qui accroissent sensiblement la consommation d'énergie.

Pour la commodité de lecture on expose séparément les innovations dans les moteurs et les carburants ; cependant il ne faut pas oublier que moteur et carburant constituent un couple apparié et qu'en général le fonctionnement optimal d'un moteur nécessite le carburant qui lui convient le mieux (et pas tous les carburants possibles).

1- Les évolutions des technologies moteurs.

Les moteurs conventionnels, c'est-à-dire les moteurs à combustion interne à mouvement alternatif fonctionnant au gazole ou à l'essence, peuvent encore améliorer sensiblement leur rendement énergétique.

Par ailleurs il existe des moteurs non conventionnels qui devraient se développer dans le futur : les véhicules hybrides (essence, diesel, gaz ou hydrogène) et le moteur électrique alimenté par une pile à combustible (éventuellement par des batteries à très hautes performances).

1.1- Les évolutions technologiques sur les moteurs diesel.

De par son principe de combustion le moteur diesel à injection directe consomme de 25 à 30% d'énergie de moins qu'un moteur à essence de même performance.

Deux innovations sont destinées à percer : le « downsizing » et la combustion homogène HCCI.

1.1.1- Le « downsizing »

Cette approche permet de réduire la consommation de 5 à 10%. Elle consiste en la diminution de la cylindrée tout en maintenant les performances. Cette technologie repose sur deux innovations : l'injection directe haute pression (2 000 bars) et la

³¹ Notamment sur le document « Futures évolutions des motorisations dans l'automobile » (Philippe Pinchon,, directeur moteurs-énergie, IFP 6 mai 2004) et sur les publications « Panorama » annuels de l'IFP.

³² Les deux autres éléments sont l'aérodynamisme et le roulement pour lesquels les gains potentiels sont sensiblement plus faibles.

turbosuralimentation à géométrie variable³³. Les principaux constructeurs européens ont déjà introduit de tels moteurs.

1.1.2- Les moteurs HCCI.

Dans le futur on pourra gagner de 10 à 15% supplémentaires grâce aux nouveaux procédés de combustion homogène HCCI (homogeneous charge compression ignition) : on homogénéise le mélange avant le déclenchement de la combustion. De tels moteurs devraient être commercialisés vers 2010.

1.2- - Les évolutions technologiques sur les moteurs à essence.

Ces évolutions concerneront la combustion, la distribution variable du mélange air-essence et la suralimentation de ce dernier.

1.2.1- L'amélioration de la combustion.

Par rapport au moteur à essence traditionnel à injection indirecte on peut actuellement obtenir un gain de consommation de 10 à 15% par l'une ou l'autre des voies suivantes :

- l'injection directe du carburant (IDE : injection directe essence) dans la chambre de combustion (au lieu de l'injection indirecte)
- la combustion stratifiée, c'est-à-dire un contrôle de l'injection visant à localiser un nuage riche en essence au voisinage de la bougie d'allumage tandis que le reste de la chambre est rempli d'air

Entre 2010 et 2015 un nouveau type de moteur devrait être commercialisé : le moteur CAI (controlled auto ignition) ou moteur à auto-inflammation contrôlée. La bougie d'allumage disparaît ; l'auto-inflammation du mélange air-essence est provoquée par la présence (volontairement créée) de gaz chauds résiduels de la combustion précédente. Les gains obtenus seraient du même ordre de grandeur que les solutions précédentes.

1.2.2- La distribution variable du mélange air-essence.

L'objectif est d'obtenir un réglage optimal de la distribution en fonction des conditions d'utilisation du moteur. Pour cela un calculateur électronique varie le moment d'ouverture et la levée des soupapes d'admission et d'échappement.

Actuellement, à partir de la technologie avec arbre à cames on peut obtenir un gain de 7 à 10% en couplant à l'admission un dispositif de soupapes à calage variable (VVT : variable valve timing) et de soupapes à levée variable (VVL : variable valve lift) avec à l'échappement un dispositif de soupapes à calage variable (VVT).

Dans un avenir proche on pourra se passer de l'arbre à came grâce à une commande électromécanique des soupapes, ce qui ferait gagner encore quelques % de consommation.

1.2.3- La suralimentation par turbocompresseur avec réduction de la cylindrée.

C'est la voie la plus prometteuse. Elle représente le « downsizing » du moteur à essence qui, appliqué au moteur à injection indirecte, permet des économies de carburant allant de 10 à 15%

Couplé à l'injection directe essence (IDE) les gains varient selon les combinaisons de systèmes de distribution et avec l'introduction du système de compression variable (VCR : variable compression ratio) :

- IDE + (VVT et VVL à l'admission) : 18 à 20%
- IDE + (VVT et VVL à l'admission) + (VVT à l'échappement) : 25%
- IDE + (VVT et VVL à l'admission) + (VVT à l'échappement) + VCR : 30%

Ces derniers moteurs devraient apparaître sur le marché avant 2010.

³³ récupération des gaz d'échappement pour actionner un compresseur qui injecte sous pression l'air d'admission

1.3- Les évolutions technologiques sur les moteurs non conventionnels.

On considère ici les moteurs non conventionnels déjà existants ou susceptibles d'être produits en série vers 2015-2020.

Ce sont :

- les véhicules électriques
- les véhicules hybrides
- les véhicules à pile à combustible
- les véhicules dont le moteur à combustion interne est dédié au gaz naturel ou à l'hydrogène

1.3.1- Les véhicules électriques.

Malgré leurs avantages intrinsèques (rendement très supérieur au moteur à combustion interne, couple moteur important au démarrage, véhicule silencieux et agréable à conduire, véhicule non polluant et n'émettant pas de CO₂, ...) les véhicules électriques n'ont pas connu le succès espéré.

Leur coût est plus élevé que celui des moteurs conventionnels ; les batteries sont encombrantes, lourdes et posent un problème environnemental en fin de vie. Cependant leur principal inconvénient est leur autonomie très réduite (100 à 200km) provenant de la faible capacité de stockage des batteries. Les meilleures batteries actuelles ne concentrent que 310 Wh/l à comparer aux 9.800 Wh/l du gazole soit 30 fois moins. Au final pour faire 100 km avec une automobile de gamme moyenne diesel il faut 6 litres de gazole (5 kg) ou 60 litres de batterie (120 kg) , soit un rapport en poids de 1 à 24 malgré un rendement énergétique trois fois supérieur du moteur électrique.

Par conséquent on ne peut espérer un fort développement des véhicules électriques classiques que si une rupture technologique majeure intervient dans le domaine des batteries, ce qui ne semble guère possible avant 2020 en l'état de nos connaissances.

1.3.2- Les véhicules hybrides.

Un véhicule hybride est caractérisé par une motorisation mixte thermique/électrique.

L'objectif recherché est de minimiser la consommation de carburant (et par suite de réduire les émissions de CO₂) en optimisant le fonctionnement de chacun des moteurs: la pleine efficacité du moteur électrique se fait au démarrage et à faible vitesse (moins de 40 km/h), alors que celle du moteur thermique a lieu aux grandes vitesses (90 km/h et au-delà).

Le gain en efficacité énergétique du groupe moteur peut atteindre jusqu'à 50% (dans la version hybride totale du type de celle de la Prius de Toyota améliorée). Cependant il ne faut pas oublier que l'hybridation nécessite deux moteurs différents dans un même véhicule, un système de stockage de l'énergie électrique et de l'électronique de puissance³⁴, ce qui induit un surcoût important et une augmentation sensible du poids du véhicule. Mais l'hybridation est un principe modulable : on peut commencer par une hybridation légère (par exemple l'arrêt du moteur thermique au ralenti, puis le couplage avec la récupération de l'énergie de freinage), moins coûteuse et d'un bon rapport qualité/prix, pour aboutir à une hybridation totale. Ainsi la pénétration de l'hybridation peut se faire de manière progressive dans le temps.

Le moteur thermique peut être un moteur à essence (cas de la Prius), un moteur diesel, un moteur dédié au gaz naturel ou même à l'hydrogène.

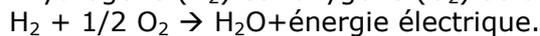
1.3.3- Les véhicules à pile à combustible.

Ces véhicules sont des véhicules à moteur électrique où l'électricité est fabriquée à bord par une pile à combustible à partir de l'hydrogène et de l'oxygène de l'air.

Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. Dans cette dernière l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂) sont produits en faisant passer un courant électrique dans un électrolyte.

³⁴ L'électronique de puissance est une branche de l'électrotechnique. Elle concerne les dispositifs (les convertisseurs) permettant de transformer l'énergie électrique en une autre forme d'énergie.

La pile à combustible produit du courant grâce à une réaction électrochimique où l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂) se combinent pour former de l'eau :



Donc, a priori, un véhicule utilisant ce système ne rejetterait que de l'eau !

Alors que l'oxygène est directement disponible dans l'atmosphère, l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel : il est toujours combiné avec d'autres molécules (sous forme d'hydrocarbures, par exemple). Il faut donc le fabriquer, ce qui consomme de l'énergie.

L'hydrogène peut être produit industriellement ; dans ce cas, il est embarqué sous forme de gaz comprimé, le plus souvent à 300 bars³⁵. Mais le gain environnemental de cette méthode dépend du mode de production de l'hydrogène.

Une autre solution est de fabriquer l'hydrogène à bord du véhicule, au fur et à mesure des besoins. Cette opération est réalisée grâce à un équipement embarqué : le « reformeur ». Ce dernier extrait l'hydrogène de composés organiques. La méthode la plus employée est celle du reformage du méthanol (CH₃OH) ; mais l'hydrogène peut également être extrait de l'éthanol (C₂H₅OH), du gaz naturel (CH₄), de l'essence... Là encore, le bilan environnemental dépend du produit utilisé.

Bien que la pile à combustible apporte un rendement global de 30% à 40%, contre 10% à 30% pour le moteur thermique, son développement industriel se fera vraisemblablement à long terme (15 à 20 ans) pour deux raisons principales : d'une part de nombreux problèmes techniques sont encore mal résolus, notamment son stockage à bord quand il est produit industriellement ; d'autre part, son coût est actuellement très élevé. D'après l'Institut Français du Pétrole³⁶, le coût des piles fabriquées aujourd'hui (de type PEM « Proton Exchange Membrane » ou basse température) est supérieur à 3 000€/kW, à comparer aux 30 à 50€/kW pour les moteurs thermiques conventionnels produits en série.

1.3.4- Le moteur thermique dédié à l'hydrogène.

Ce type de moteur est envisageable s'il est possible de créer un réseau de distribution d'hydrogène. Outre les problèmes de sécurité son inconvénient principal est une forte diminution du couple³⁷ et de la puissance spécifique³⁸ (de -40 à -50% par rapport au moteur thermique à essence), ce qui implique un système de turbosuralimentation.

Cette solution est souvent présentée comme étape vers la pile à combustible : elle permet de valider la filière hydrogène sans nécessiter un parc important de véhicules à pile à combustible.

1.3.5- Le moteur thermique dédié au gaz naturel.

Ce type de moteur existe déjà. Le gaz naturel véhicule (GNV) est composé à 90% de méthane (CH₄). Le faible rapport C/H de ce gaz réduit les émissions de CO₂ par rapport aux carburants d'origine pétrolière (de l'ordre de 20%).

Par ailleurs le GNV possède un indice d'octane élevé (environ 130) ce qui améliore le rendement du moteur.

Actuellement les moteurs GNV sont souvent des adaptations de moteurs diesel et à essence existants car le marché est relativement réduit.

Les performances du GNV peuvent être améliorée en lui ajoutant de l'hydrogène. On obtient de l'hythane, carburant composé à 20% d'hydrogène et 80% de méthane.

³⁵ On effectue aussi des recherches pour son transport sous forme liquide ou sous forme d'hydrures métalliques.

³⁶ « Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme » IFP. Panorama 2004.

³⁷ Le couple est en quelque sorte la force qu'exerce le moteur sur les roues. Plus concrètement c'est la force mesurée à l'extrémité d'une barre d'un mètre de long fixée perpendiculairement à la sortie du vilebrequin. Le couple s'exprime en Newton-mètre.

³⁸ La puissance révèle l'énergie que peut fournir un moteur à un régime (vitesse de rotation) donné. La puissance est proportionnelle au produit CxR où C est le couple et R le régime. Par exemple si on exprime C en Nm et R en tours/minute on a P (kW) = CxR/9549.

La puissance spécifique (puissance au litre) est le rapport de la puissance maximum à la cylindrée en litres

L'hythane permettrait au véhicules fonctionnant au GNV d'atteindre plus aisément la future norme Euro 5 et d'abaisser de 20% ses émissions de CO₂. Il a déjà été testé au Canada et aux Etats-Unis sur des flottes de bus. En France une expérimentation grandeur nature devrait commencer en janvier 2006 sur cinq bus : trois à Toulouse et deux à Dunkerque.

A l'avenir le GNV pourrait être utilisé dans un véhicule hybride GNV/électricité car c'est potentiellement une des solutions les plus performantes en ce qui concerne les émissions de CO₂ si on fait un bilan du puits à la roue (au lieu d'un bilan à la seule combustion dans le moteur). Cette évolution pourrait se faire en deux étapes : la première étape consisterait à optimiser un moteur dédié GNV par le biais d'un « downsizing » poussé couplé avec la turbosuralimentation ; la seconde étape serait le véhicule hybride.

2- Les évolutions dans les carburants.

On présente ici les carburants alternatifs actuels à l'essence et au diesel (GPL, GNV, Biocarburants) puis les carburants de synthèse du futur (GTL, CTL, BTL) . On ne mentionne pas l'hydrogène qui a déjà été traité précédemment.

2.1 Les carburants alternatifs actuels.

2.1.1- Le Gaz Pétrole Liquéfié (GPL)

Le GPL est un sous produit de raffinage du pétrole, composé d'un mélange de butane (C₄H₁₀) et de propane (C₃H₈). Son utilisation est compatible avec les motorisations actuelles, et permet d'émettre moins d'hydrocarbures imbrûlés que l'essence. Depuis 1998, son utilisation sur des véhicules légers est entièrement sécurisée grâce à la pose d'une soupape.

Pour l'instant, les moteurs fonctionnant au GPL ont une surconsommation en volume d'environ un tiers par rapport au moteur essence, et de trois quarts par rapport au moteur diesel. Il produit 10 à 15% de moins de CO₂ que l'essence.

Le point le plus négatif du GPL réside dans ses rejets en monoxyde de carbone (CO) supérieurs à ceux de l'essence et du diesel : jusqu'à 300 fois plus par rapport à ce dernier.

Il ne semble pas appelé à un fort développement.

2.1.2- Le Gaz Naturel Véhicule (GNV)

On a déjà abordé ce thème à propos du moteur thermique dédié au gaz naturel (§ 1.3.5).

2.1.3- Les biocarburants

Les biocarburants sont des carburants liquides ou gazeux fabriqués à partir des produits agricoles (colza, tournesol, maïs, soja, betterave, canne à sucre, blé, pomme de terre, etc)

En 2003, ils représentaient 0,7% du volume total de carburants utilisés dans les transports en France³⁹ (0,4% en contenu énergétique). L'objectif communautaire est de 2% fin 2005 et de 5,75% fin 2010 (en contenu énergétique). Le gouvernement français a décidé récemment⁴⁰ d'accélérer fortement leur pénétration dans les livraisons de carburants avec des objectifs très ambitieux : 5,75% d'incorporation en 2008 ; 7% en 2010 ; 10% en 2015.

Les deux principaux biocarburants actuellement développés industriellement sont les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV) et l'éthanol.

³⁹ « Rapport d'information n° 1662 sur les biocarburants » Alain MARLEIX. Assemblée nationale. 26 mai 2004.

⁴⁰ Annonce faite le 13 septembre 2005 par le Premier ministre, M. Dominique de Villepin.

Les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV)

L'huile végétale (de colza, tournesol, maïs ou soja) est transformée chimiquement en EMHV par réaction avec du méthanol (CH₃OH)⁴¹.

En France, les EMHV sont ajoutés au gazole à un taux maximum de 5% seulement pour éviter des problèmes de volatilité du produit (Pour les flottes captives ce taux peut aller jusqu'à 30%). Ils ont comme avantage d'avoir un bon pouvoir lubrifiant, et de ne pas nécessiter de modification du moteur diesel.

On dénomme souvent le mélange obtenu « diester », contraction de diesel et ester.

Pendant leur croissance les végétaux vont consommer une part du CO₂ émis lors de la production et de la combustion du carburant. Pour la même quantité d'énergie disponible l'EMHV émet 70% moins de CO₂ que le gazole : on économise ainsi 2,5 tonnes équivalent CO₂ par tonne d'ester⁴².

La production d'un litre d'EMHV coûte 0,35€⁴³, mais bénéficie d'une importante défiscalisation (0,33€ en 2004). A énergie égale il coûte près de 2 fois plus cher à produire que le gazole (10,5€ par gigajoule contre 6€⁴⁴ par gigajoule)

L'éthanol

L'éthanol (C₂H₅OH), ou « alcool éthylique », est issu de plantes à forte teneur en sucre (betterave, canne à sucre), ou en amidon (blé, maïs pommes de terre, ...). Il résulte de la fermentation du sucre de ces plantes. Il a surtout été développé dans deux pays : le Brésil et les Etats-Unis.

En France il est produit à 70% à partir de la betterave à sucre et à 30% à partir du blé⁴⁵. L'emploi d'éthanol pur est interdit. Il est en revanche incorporable dans l'essence à hauteur de 5% ou sous sa forme éther (ETBE) jusqu'à 15%.

L'ETBE (Ethyl Tertio Butyl Ether) est un produit oxygéné dérivé de l'éthanol par adjonction d'isobutylène (C₄H₈)⁴⁶. Il est utilisé en additif dans l'essence (15% maximum) pour remonter son indice d'octane. Ceci permet de diminuer les risques de cliquetis. De plus, il améliore la combustion du carburant, car il constitue un apport en oxygène.

De la même manière que pour l'EMHV, le CO₂ est partiellement recyclé pendant la croissance des matières végétales sources d'éthanol et de EBTE. Par rapport à l'essence on économise 2,7 tonnes équivalent CO₂ par tonne d'éthanol⁴⁷. Le litre d'éthanol coûte 0,38€⁴⁸ à produire et bénéficie aussi d'une défiscalisation importante (0,38€ en 2004). A énergie égale il coûte 3 fois plus cher à produire que l'essence (18€ par gigajoule contre 6€⁴⁹ par gigajoule)

En résumé le principal avantage des biocarburants est leur bilan global sur les émissions de CO₂. Leur grand handicap est leur coût de production qui a constitué jusqu'ici un frein à leur développement. Cependant le maintien du prix du pétrole à son niveau actuel favorisera leur pénétration future.

2.2- Les carburants de synthèse du futur.

A moyen terme on peut envisager la production de carburants liquides classiques (essence, gazole) à partir d'autres ressources que le pétrole : gaz naturel, charbon, biomasse. Ce sont respectivement les technologies GTL, CTL et BTL.

2.2.1- Les technologies GTL (Gas to Liquid).

⁴¹ En associant 1 tonne d'huile à 0,1 tonne de méthanol on obtient 1 tonne d'EMHV et 0,1 tonne de glycérine.

⁴² ADEME. Journée débat biocarburants. 13 mai 2003. Dossier de presse.

⁴³ « Les biocarburants en Europe ». IFP. Panorama 2004.

⁴⁴ Calcul effectué par l'IFP sur la base d'un prix du brut de 25\$ le baril

⁴⁵ « Rapport d'information n° 1662 sur les biocarburants » Alain MARLEIX. Assemblée nationale. 26 mai 2004

⁴⁶ L'ETBE comprend 47% d'éthanol et 53% d'isobutylène (sous-produit de raffinage du pétrole)

⁴⁷ ADEME. Journée débat biocarburants. 13 mai 2003. Dossier de presse

⁴⁸ « Les biocarburants en Europe ». IFP. Panorama 2004.

⁴⁹ Calcul effectué par l'IFP sur la base d'un prix du brut de 25\$ le baril

Ces technologies permettent de fabriquer des carburants à partir du gaz naturel en utilisant le procédé de synthèse Fischer-Tropsch (FT)⁵⁰.

Le GTL est un carburant de très bonne qualité, car il ne contient pas de composés aromatiques, d'oléfines, ni de soufre.

Ces dernières années les coûts de production ont été fortement réduits.

2.2.2- Les technologies CTL (Coal to Liquid).

De la même manière que précédemment il est possible, mais plus coûteux, de produire des carburants à partir du charbon par les technologies CTL. On rappelle que les réserves mondiales de charbon représentent 200 années de consommation actuelle.

Ces 20 dernières années peu d'efforts de recherche ont été engagés dans le CTL mais une montée durable du prix du pétrole pourrait relancer son intérêt.

Une étude récente de l'IFP⁵¹ conclut que, pour un prix du charbon de 30€ la tonne la filière CTL peut s'avérer compétitive dès lors que le prix du baril de pétrole demeure supérieur à 35-40€.

2.2.3- Les technologies BTL (Biomass to Liquid).

Cette filière est au stade de la recherche-développement pour la production du gazole.

Les matières collectées (bois, herbe, ...) sont transformées en « gaz de synthèse » puis en gazole par le procédé de synthèse Fischer-Tropsch.

Actuellement les coûts de production sont très élevés : 700-800€ par tonne équivalent gazole.

Le gros intérêt de la filière BTL, à l'instar des biocarburants, réside dans son bilan global CO₂ (la biomasse absorbe du CO₂ en phase de croissance).

En résumé les carburants de synthèse pourraient se développer si le prix du pétrole devient durablement élevé. Du point de vue de l'effet de serre c'est la technologie BTL qui est la plus intéressante ; mais ses coûts de production sont actuellement très élevés et sa percée dépendra de progrès technologiques majeurs dans sa fabrication .

⁵⁰ Procédé inventé en 1920 par deux allemands : MM. Fischer et Tropsch. Il synthétise des hydrocarbures (C_xH_y) à partir de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂).

⁵¹ Cité dans « Moteurs/carburants : quelles évolutions sur le long terme ». IFP. Panorama 2004.

3- Synthèse.

Le tableau ci-après résume l'exposé technologique précédent, avec une estimation de leur date probable de mise sur le marché.

Période de mise sur le marché	Innovation technologique	Gain par rapport au moteur conventionnel essence actuel (injection indirecte, catalyse 3 voies)	
		En consommation d'énergie	En émission de CO ₂
Aujourd'hui	Downsizing (D)	30 à 35%	30 à 35%
	Injection directe (E)	10 à 15%	10 à 15%
	Combustion stratifiée (E)	10 à 15%	10 à 15%
	Distribution variable (E)	7 à 13%	7 à 13%
	Hybride type Prius (E)	30% ⁽¹⁾	30% ⁽¹⁾
	Biocarburants (D, E) incorporation 1%	nd	70% ⁽²⁾
2006-2010	« downsizing » via la suralimentation par turbocompresseur avec réduction de la cylindrée et injection directe (E)	18 à 30%	18 à 30%
	Hybrides légers (E)	10 à 15% ⁽¹⁾	10 à 15% ⁽¹⁾
	Hybrides légers (D)	30 à 40% ⁽¹⁾	30 à 40% ⁽¹⁾
	Moteur dédié au gaz naturel	nd	30 à 35%
	Biocarburants (D, E) incorporation 7%	nd	70% ⁽²⁾
2011-2015	Diesel HCCI (D)	35 à 40%	35 à 40%
	Distribution variable (D)	30 à 35%	30 à 35%
	Injection directe haute pression (E)	10 à 15%	10 à 15%
	CAI (E)	10 à 15%	10 à 15%
	Hybride total parallèle/série (E)	45% ⁽¹⁾	45% ⁽¹⁾
	Biocarburants (D, E) incorporation 10%	nd	70% ⁽²⁾
	(?) Carburants de synthèse GTL, CTL	nd	nd
2016-2020	Hybride total diesel (D)	50%	50%
	Hybride gaz naturel	nd	50 à 55%
	Hybride hydrogène	nd	nd
	(?) Carburant de synthèse BTL	nd	70% ⁽²⁾
Après 2020	Pile à combustible	20 à 50% ⁽³⁾	20 à 90% ⁽³⁾
	(?) Batteries électriques à très hautes performances	nd	100%

E : véhicules à essence

D : véhicules diesel

(1) estimation en conduite urbaine

(2) calcul fait du puits à la roue sur la seule partie de l'essence ou du gazole substituée par le biocarburant approprié

(3) dépend du mode de fabrication et du système de transport à bord de l'hydrogène (la meilleure performance est liée à la production industrielle de l'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité d'origine nucléaire)

On attire l'attention du lecteur sur l'approximation à la fois des dates de mise sur le marché et sur les gains attendus en consommation et en émissions de CO₂.

Les dates de mise sur le marché dépendent en premier lieu des progrès technologiques. C'est le cas de la pile à combustible : la date retenue correspond à l'état d'avancement actuel des recherches. Une rupture technologique pourrait l'avancer ; à l'inverse le piétinement futur des résultats de recherche peut la retarder. On peut aussi conjecturer que « l'impossible » arrive, par exemple qu'après des décennies d'avancées graduelles

dans le stockage à bord de l'électricité (les batteries) une percée majeure se produise. Dans ce cas le moteur tout électrique classique prendrait un essor non prévisible à ce jour et supplanterait vraisemblablement la pile à combustible.

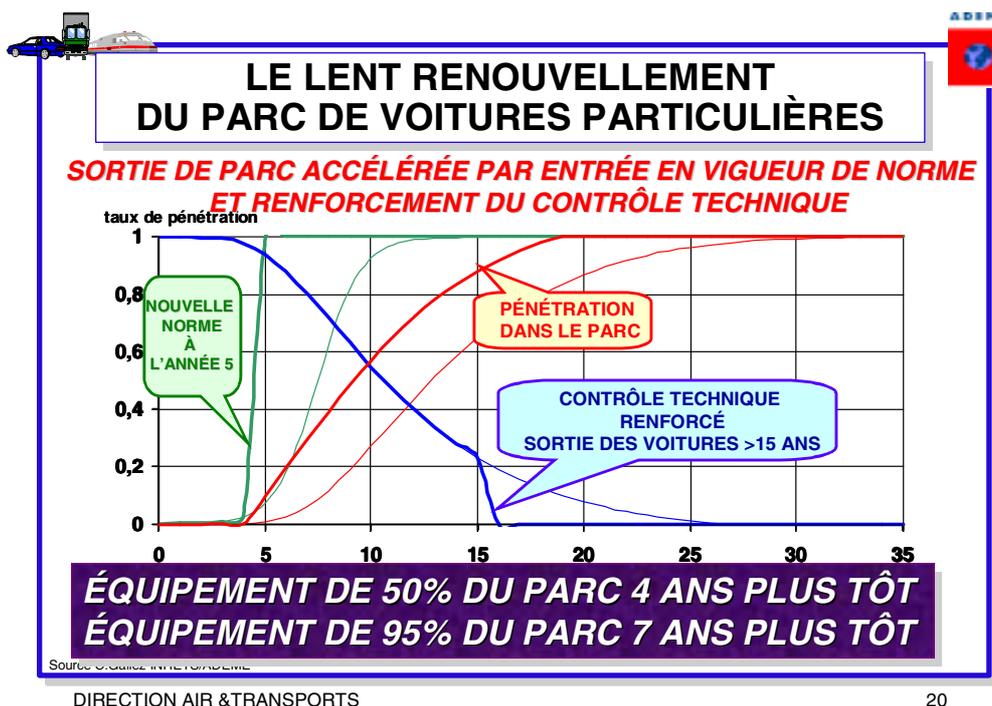
En second lieu elles dépendent du niveau de prix du pétrole. C'est un facteur déterminant pour les carburants de synthèse GTL (gaz to liquid), CTL (coal to liquid) et surtout BTL (biomass to liquid) dont on doit également réduire drastiquement le coût de production.

Les gains espérés pourraient également changer avec l'amélioration des technologies.

D'une manière générale plus la date probable de mise sur le marché est éloignée plus les incertitudes sont élevées.

4- Conclusion.

La propulsion des véhicules automobiles routiers dépendra majoritairement pendant encore longtemps du moteur à combustion interne, essentiellement pour deux raisons : d'une part parce que la solution technologique de rupture – le moteur électrique alimenté par une pile à combustible, voire par des batteries à très hautes performances – n'est pas au point techniquement et est très chère ; d'autre part parce que le renouvellement du parc automobile est lent. On rappelle que la pénétration naturelle d'une nouvelle technologie sur tous les véhicules neufs nécessite 15 ans, la pénétration sur tout le parc roulant au moins 25 ans ; on rappelle également que la combinaison des mesures d'accélération de la sortie de parc des véhicules anciens (nouvelle norme, contrôle technique et sortie des véhicules à partir de 15 ans d'âge) ne raccourcirait que de 7 ans le délai de pénétration totale du parc⁵² (voir figure ci-dessous)



L'analyse précédente montre cependant que l'on peut améliorer sensiblement le rendement énergétique des moteurs conventionnels (diesel et à essence) ainsi que celui des moteurs non conventionnels à combustion interne (gaz naturel, hydrogène, hybrides).

Côté carburants on peut développer les biocarburants actuels (EMHV, ETBE, éthanol) dont l'intérêt est surtout le bilan CO₂ « du puits à la roue ». Toutefois il semble que l'on

⁵² Voir Alain Morcheoine « es transports au XXIème siècle », rencontre internationale de prospective du Sénat, 8 avril 2004.

ne puisse guère dépasser l'objectif de 10% d'incorporation pour des raisons pratiques, notamment de conflit avec d'autres productions agricoles⁵³. L'espoir viendrait plutôt des technologies BTL (carburants de synthèse à partir de la biomasse) dont le bilan CO₂ « du puits à la roue » est du même ordre que les biocarburants, à condition d'améliorer très sensiblement à la fois leur technique de fabrication et leur rentabilité économique.

Enfin, comme le montent les scénarios « facteur 4 » déjà produits⁵⁴, la seule technologie ne suffira pas à atteindre dans le domaine des transports l'objectif 2050 souhaité par la loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique, même en cas de succès de la pile à combustible. La rupture avec la dépendance pétrolière des transports routiers devra également se faire par le biais de l'organisation économique et sociale et par des changements de comportements.

⁵³ Un calcul simple montre que si on souhaite faire fonctionner les transports terrestres non électriques actuels (consommant 44,4 ktep de produits pétroliers en 2002) avec les seuls biocarburants il faudrait y consacrer 1,5 à 2 fois la superficie des surfaces cultivables.

⁵⁴ Scénarios cherchant à respecter l'objectif de division par « quatre ou cinq » des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (Article 2 de la récente loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique). Voir par exemple « La division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050 » (Pierre Radanne, MIES, mars 2004) et « Etude pour une prospective énergétique concernant la France. Rapport final » (ENERDATA, DGEMP, 1^{er} février 2005)