

LE VEHICULE ELECTRIQUE A L' HORIZON 2050

*Introduction du véhicule
électrique dans le parc français
des véhicules particuliers
à l'horizon 2050*

Auteurs

Georgia PLOUCHART (CNRS – ECODEV)
Stéphane HIS (IFP)
Cette étude a été financée par EDF et le CNRS-Ecodev

Synthèse

Saviez-vous que les premiers véhicules

électriques ont fait leurs débuts il y a déjà plus de cent ans, et qu'ils dominaient alors le marché des voitures motorisées ? À titre anecdotique, le record du monde de vitesse en 1899 a été atteint par un véhicule électrique sur une course de 1 km. Jusqu'aux années 20, ce type de véhicule est resté compétitif face aux véhicules à moteur à combustion interne. Mais depuis plus de 70 ans, il s'est vu remplacé progressivement par ces derniers, de plus en plus performants, et qui composent aujourd'hui l'essentiel des parcs automobiles.

La principale qualité du véhicule électrique est de n'émettre aucun polluant à l'échappement, ce qui permet de diminuer l'intensité des pics de pollution dans les zones urbaines à forte densité de population. Mais, avec une autonomie limitée et un temps de recharge extrêmement long, dans quelles proportions peut-il pénétrer dans le parc automobile ? La production d'électricité en Europe, basée en partie sur des énergies fossiles dont la combustion génère des quantités importantes de CO₂, ne rend-elle pas finalement le véhicule électrique européen plus polluant qu'un véhicule hybride type "Prius" dont la consommation devrait, à terme, atteindre 3 litres aux 100 km ? Dans ce cas, le véhicule électrique français, avec un parc de production essentiellement nucléaire, n'est-il pas beaucoup plus intéressant ? Cependant, à l'heure où l'on envisage la fin de vie des centrales nucléaires vers 2010-2020 et où la France ouvre ses portes à la concurrence, que va-t-il advenir du parc électrique français ? Quel est, enfin, le plus intéressant des véhicules hybrides, le "deux en un" qui implique une recharge sur le réseau électrique ou celui du type "Prius" qui ne le nécessite pas ?

C'est autant de questions qu'aborde ce document. Basé sur la même méthodologie que l'étude "Automobile et Développement durable" éditée dans les cahiers du CLIP n°9, il a pour objectif d'analyser l'impact environnemental lié à l'introduction dans le parc automobile de véhicules à alimentation électrique par rapport à celle de véhicules s'alimentant en carburant.

Les véhicules étudiés dans cette étude sont de

plusieurs types :

- électriques avec un temps de recharge de 1h et une autonomie de 300 km ;
- hybrides dit "2 en 1" munis d'une double motorisation diesel et électrique nécessitant une recharge sur réseau électrique ;
- hybrides dit de type "Prius", avec une double motorisation (diesel et électrique), mais n'impliquant pas de ponction sur le réseau ;
- à pile à combustible à méthanol, produit à partir de gaz naturel ;
- à pile à combustible à hydrogène liquéfié, produit à partir de gaz naturel.

Un scénario d'introduction dans le parc de véhicule particulier a été élaboré pour chacune de ces technologies. Pour les automobiles réclamant une alimentation électrique, deux parcs de production d'électricité, français et européen, ont été pris en compte. Dans les deux cas, la technologie de pointe du cycle combiné appliquée au gaz naturel a été intégrée progressivement jusqu'en 2050. En France, elle remplace un tiers des centrales nucléaires, notamment pour des raisons politiques, cette technologie étant de plus en plus rejetée par le grand public. En Europe, elle remplace la filière du charbon dans sa quasi-totalité parce qu'elle offre un meilleur rendement et une réduction considérable des émissions de CO₂.

En premier lieu, les résultats montrent, dans tous les scénarios, une réduction des polluants locaux de 75 % entre 2015 et 2050, engendrée par l'application de la norme Euro 2005. Il faut souligner que cette nette diminution d'émissions de polluants locaux en moyenne annuelle, n'exclut pas l'apparition de pics de pollution, mais implique seulement une baisse de leur fréquence et de leur intensité.

Ainsi, le défi principal à relever réside dans la réduction des émissions de CO₂ et de la consommation énergétique du parc de voitures particulières. En effet, la croissance du parc (39 % sur la période 1995-2050) dans le cas d'un scénario "laisser-faire" où la composition du parc ne laisse apparaître que des véhicules à moteur à combustion interne à l'horizon 2050, estompes les efforts mis en œuvre pour réduire les consommations de carburant (injection directe, common

rail). Ainsi, en considérant ce dernier scénario, pour 26 Mtep et 78 Mt de CO₂ consommés et émis aujourd'hui, 30 Mtep et 88 Mt de CO₂ seront consommés et émis en 2050 ; soit une augmentation de la consommation d'énergie de 22 % et des émissions de CO₂ de 17 %.

C'est donc sur ce point que l'introduction de nouveaux véhicules à faibles émissions de CO₂ et consommation énergétique joue un rôle important. Dans ce cadre, parmi l'ensemble des technologies étudiées, on peut distinguer quatre catégories :

- le véhicule "très haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un meilleur bilan (par exemple CO₂ ou énergie) en 2050 que celui d'aujourd'hui ;
- le véhicule "haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile permet de maintenir un bilan (par exemple CO₂ ou énergie) invariant entre les valeurs d'aujourd'hui et celles en 2050 ;
- Le véhicule "moyenne performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (par exemple CO₂ ou énergie) plus performant que celui du scénario "laisser-faire" en 2050, mais ne permet pas de maintenir les valeurs du bilan (par exemple CO₂ ou énergie) d'aujourd'hui ;
- Le véhicule "faible performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (par exemple CO₂ ou énergie) plus mauvais que celui du scénario "laisser-faire" en 2050. Les résultats des scénarios nous montrent qu'en termes d'émissions de CO₂, sont de "très haute performance" les véhicules hybrides et les PAC méthanol, de "haute performance" les véhicules électriques, et de "faible performance" les PAC à hydrogène liquéfié. En terme de consommation énergétique sont de "très haute performance" les véhicules hybrides, de "haute performance" les PAC méthanol et de "moyenne performance" les véhicules électriques et les PAC à hydrogène liquéfié.

Ainsi, parmi les types de voiture étudiés, les véhicules hybrides offriraient la meilleure solution d'amélioration du bilan environnemental. De plus, contrairement au cas des filières pile à combustible dont la mise en œuvre nécessiterait des adaptations industrielles majeures (autant pour la production du carburant que pour celle du groupe moto-propulseurs), les voitures hybrides ne nécessitent pas d'adaptation des structures en place.

En ce qui concerne les voitures dites à "zéro

émission" (émissions de polluants locaux), le scénario d'introduction du véhicule électrique présente les meilleurs résultats à l'horizon 2050. Ce type d'automobile montre aussi une très forte capacité (par rapport aux autres automobiles analysées) à réduire les émissions globales de CO₂ du parc de voitures particulières sur la période 2010-2030, cette propriété est non maintenue par la suite du fait de la limitation de ses parts de marché à une valeur butoir de 26 %. Il reste que ces résultats sont fragiles car tributaires de la filière de production d'électricité et de la valeur limite de son taux de pénétration dans le marché, liée à l'autonomie et au temps de recharge. Par ailleurs, la PAC H₂₁, qui posséderait, à l'inverse du véhicule électrique, l'avantage d'un confort d'utilisation proche de celui d'un véhicule classique, est tributaire du mode de stockage de son carburant. En effet, le seul moyen actuel de lui donner une autonomie raisonnable est de liquéfier l'hydrogène. Mais cette étape pénalise la filière et l'empêche de rivaliser avec les performances environnementales des autres véhicules. Le stockage de l'hydrogène reste donc, aujourd'hui, l'un des points les plus délicats freinant le développement de ce carburant et seule une avancée majeure dans ce domaine pourrait faire basculer les résultats du scénario "PAC H₂₁".

L'impact de la structure du parc de production d'électricité n'est significatif qu'en termes d'émissions globales de CO₂ dans le cas des scénarios véhicule électrique et véhicule hybride type "2 en 1" : 3 % de différence en faveur du parc électrique français en 2050. Dans le cas du scénario PAC H₂₁ (l'usage de l'électricité intervenant dans l'étape de liquéfaction de l'hydrogène), la distinction apparaît principalement au niveau de la consommation énergétique du parc automobile, qui est près de 4 % supérieure en 2050 dans le cas du parc électrique français par rapport au parc européen.

En conclusion, cette étude nous conduit à opter pour une introduction massive de véhicules hybrides dans le marché. Les véhicules électriques à zéro émission peuvent être un bon complément, particulièrement à court terme, pour réduire les émissions locales des zones de trafic denses. Néanmoins, le temps de recharge important et l'autonomie trop faible de ces voitures par rapport à l'automobile thermique limitent leurs applications à des missions et donc des marchés spécifiques.

Introduction

"Il y a pollution de l'air lorsque la présence d'une substance étrangère ou une variation importante dans la proportion de ses constituants est susceptible de provoquer un effet nuisible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment ou de créer une gêne", Conseil de l'Europe - 14 septembre 1967.

L'ORS (Organisation Régionale de la Santé en Ile-de-France) a démontré dans le cadre de l'étude ERPURS (Évaluation de Risques de la Pollution Urbaine pour la Santé) un lien direct entre les pollutions atmosphériques, locale et régionale, et les problèmes de santé (respiratoires et cardio-vasculaires). À titre indicatif, sur la zone d'étude ERPURS, les transports seraient responsables de 66 %, 50 %, et 67 % des émissions respectives des oxydes d'azote, des composés organiques volatils et du monoxyde de carbone. Ils seraient entre autres responsables de 70 % des pluies acides (transformation des NO_x, du SO₂ et dans une moindre mesure du CO en composés acides au contact de l'humidité) et de 75 % de la pollution photochimique (formation d'Ozone à partir de NO_x et de divers composés organiques tels les COV et le CO).

À cette pollution locale et régionale, il faut ajouter les émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de CO₂, responsables de plus de 50 % du phénomène de renforcement de l'effet de serre, proviennent en France pour 30 % du secteur du transport. Liée aux émissions de CO₂, la consommation énergétique du secteur du transport prend aussi une part importante dans la consommation d'énergie totale en France. Elle s'élève à 21 % dont la moitié est imputable aux véhicules particuliers.

Face à ce constat, de nombreuses actions concernant les véhicules particuliers sont entreprises :

- l'application des normes Euro 2005 réduisant sévèrement les émissions à l'échappement des véhicules ;
- des restrictions de la circulation en cas de pic de pollution ;
- une politique d'expérimentation et d'encoura-

gement à l'utilisation de carburants alternatifs ou de l'électricité (ex : fiscalité "écologique"-loi de Finances 1998) ;

- des incitations exercées sur les constructeurs automobiles pour abaisser les consommations unitaires des véhicules ;

- un investissement important dans la recherche et le développement des véhicules alternatifs.

C'est dans cette optique d'amélioration du bilan environnemental lié au transport, que l'étude publiée dans les cahiers du CLIP n°9 a été réalisée. La troisième partie de cette étude était consacrée à l'analyse prospective de la filière automobile sur la période 1995-2050 avec pour objectif l'examen des solutions techniques permettant de limiter à terme l'impact sur l'environnement de la filière automobile. À cette fin, des scénarios de pénétration de différents types de véhicules ont été élaborés : GNV, GPL et véhicules alternatifs tels que la pile à combustible et l'hybride. Une analyse de cycle de vie des carburants a donc été effectuée pour chaque véhicule afin d'estimer l'impact global sur l'environnement de tels scénarios. Cette étude a pu mettre en évidence deux points :

- une forte efficacité des normes Euro 2005 à réduire la pollution locale ;
- l'importance de l'introduction d'un véhicule alternatif dans le parc automobile afin de réduire les émissions de CO₂ et la consommation d'énergie.

Le véhicule électrique n'avait pas été pris en compte dans cette étude. En effet, son autonomie très limitée (environ 100 km) et son temps de recharge à domicile de plusieurs heures le condamnent aujourd'hui à une mission de "petits trajets" et donc à rester marginal sur le marché automobile. Cependant, les recherches intenses dans le domaine des batteries entreprises ces dernières années permettent d'envisager une autonomie de 300 km et un temps de recharge d'une heure à l'horizon 2005. Sa mission deviendrait alors moins restrictive.

L'objet de cette étude est donc de compléter celle des cahiers du CLIP n°9 en évaluant les consé-

quences sur le bilan environnemental (pollution atmosphérique, émissions de gaz à effet de serre et consommation d'énergie) de l'introduction dans le parc de voitures particulières, de véhicules nécessitant une ponction électrique sur le réseau. Dans un premier temps, nous rappellerons les scénarios établis pour l'étude des cahiers du

CLIP n°9 et les hypothèses émises pour la modélisation du parc de voitures particulières en France. Les types d'automobiles étudiés et leurs scénarios d'introduction dans le parc automobile sont décrits dans une seconde partie. Enfin, le troisième chapitre est consacré à l'analyse des résultats.



Méthodologie

Principe

Le but de l'étude est de compléter la troisième partie intitulée "Analyse prospective de l'évolution du bilan énergie, environnement et matières premières du parc automobile en France (1975-2050)" de l'étude publiée dans les cahiers du

CLIP n°9 réalisée dans le cadre d'ECODEV¹ en introduisant dans le parc automobile français différents véhicules dotés d'une partie plus ou moins importante de propulsion électrique afin d'en analyser l'impact environnemental.

Rappel des scénarios établis lors de la dernière étude

Dans cette étude, trois grandes catégories de scénarios ont été établies :

- Le scénario "Laisser-Faire "

Le parc reste très majoritairement composé de véhicules essence et diesel. On assiste seulement à une faible pénétration des véhicules GPL.

- Le scénario gaz

Le parc essence est invariant par rapport au scé-

nario précédent, en revanche le véhicule GNV remplace totalement le véhicule diesel.

- Le scénario "Véhicule Évolué "

Il est marqué par une forte pénétration du véhicule dit "évolué " (hybride ou pile à combustible) à partir de 2015. Ce dernier remplace une grande partie du parc essence en 2050.

Modélisation du parc de véhicules particuliers

La méthodologie employée pour l'évolution du volume du parc reprend celle développée dans les cahiers du CLIP n°9 :

- le calcul du parc V.P. est basé sur les nouvelles immatriculations introduites chaque année et sur les coefficients de survie des différents types de véhicule ;

• le taux de croissance annuel des immatriculations reste identique à celui utilisé dans l'étude des cahiers du CLIP n°9, et s'élève à 0,07 %. Il correspond à une croissance modérée du parc ;

- les coefficients de survie² n'existant que pour les véhicules diesel et essence, une moyenne a été calculée et affectée aux autres types de véhicule. On supposera, par ailleurs, que ces coefficients sont constants au cours du temps.

Nous obtenons finalement un parc de 26,5 millions de voitures particulières (MVP) (contre 26,8 calculés par le CCFA) en 1998, de 29,9 MVP en 2020 et de 36,8 MVP en 2050, ce qui correspond à un taux d'équipement de 0,563 véhicule par habitant (chiffre actuel des États-Unis).

Construction des scénarios

Principales hypothèses et caractéristiques des scénarios

Caractéristiques des véhicules

Quatre grandes catégories de véhicules ont été étudiées : celui à propulsion électrique, hybride, à pile à combustible et thermique. Un tableau récapitulatif des caractéristiques de ces différentes automobiles est donné en annexe 1.

Le véhicule électrique

Caractéristiques

Nous avons considéré dans l'étude un véhicule électrique muni d'une batterie Lithium-Ion. Encore peu développée aujourd'hui, elle offre, d'une part, une capacité énergétique importante, avec une efficacité de recharge élevée par rapport aux batteries classiques (annexe n°1). D'autre part, elle ouvre une porte vers un autre système encore plus performant, celui de la batterie LI-SP (Solid Polymer). En prenant en compte cette avancée technologique et un investissement croissant dans ce domaine de recherche, nous pouvons envisager un véhicule électrique en 2005 avec une autonomie de 300 km et un temps de recharge d'une heure.

Consommation

Pour des raisons d'inadéquation du cycle européen (MVEG) aux véhicules électriques, toutes les consommations électriques ont été calculées à partir d'une formule³ (cf. annexe n°2) dépendant de la vitesse, du type de batterie et de la masse du véhicule.

D'après une étude INRETS⁴, décrivant le comportement des véhicules sur les réseaux routiers, 28,2 % du kilométrage annuel d'une voiture par-

ticulière est urbain (avec une vitesse moyenne de 33,6 km/h), le reste du trajet étant parcouru à une vitesse moyenne de 87 km/h. Nous avons utilisé cette répartition pour calculer la vitesse moyenne du véhicule électrique afin d'en déduire sa consommation.

Le véhicule pile combustible

L'hydrogène alimentant la PAC H_{21} ne provient pas d'une électrolyse, comme il en avait été question dans les cahiers du CLIP n°9. Il est produit à partir du gaz naturel, source primaire la plus employée actuellement pour sa production. Quant aux hypothèses de consommation des véhicules à PAC, nous nous sommes basés sur l'étude des cahiers du CLIP n°9.

Le véhicule hybride

Consommation du véhicule hybride type "Prius" (2005-2015)

Pour la période 2005-2015, sa consommation a été calculée⁵ en considérant une réduction de 40 % en régime urbain, et une réduction de 10 % en régime extra-urbain par rapport à un véhicule dont le moteur à combustion interne est identique à celui pris en compte pour la partie thermique de l'hybride. Dans notre cas, nous nous sommes basés sur la consommation du véhicule diesel à injection directe. La répartition kilométrique utilisée pour obtenir la consommation finale du véhicule, est la même que celle utilisée pour le véhicule électrique : 28 % pour la partie urbaine et 72 % pour la partie extra-urbaine.

Consommation du "2 en 1" (2005-2015)

Dans le cas du véhicule "deux en un", nous avons considéré que la consommation tout électrique comprenait 24 % du kilométrage annuel (à une vitesse moyenne de 31,4 km/h), ce qui correspond à la partie de trajet urbain sur les grands axes avec perturbation de la circulation ou sur les petites rues.

Le reste du parcours (4 % en régime urbain et 72 % en régime extra-urbain) est considéré comme effectué avec le moteur thermique. La consommation thermique est alors calculée de la même façon que celle du véhicule hybride type "Prius".

À partir de 2015

À partir de 2015, la consommation des véhicules hybrides est identique à celle établie dans l'étude des cahiers du CLIP n°9. De l'ordre de 3l équiva-

lent essence / 100 km, elle correspond à l'objectif fixé par les constructeurs. Nous l'avons alors supposé atteint en 2015.

Les véhicules moteurs combustion interne

Pour les véhicules à moteur à combustion interne, les hypothèses des cahiers du CLIP n°9 ont été reprises. Les consommations des véhicules essence et diesel classiques ont été calculées à partir de la moyenne de consommation du Panel SECODIP. La technologie de l'injection directe a été prise en compte et permet un gain de consommation de 20 % dans le cas du diesel et de 15 % dans celui de l'essence. En ce qui concerne le GPL, ses consommations (en kep/100 km) en mélange pauvre et stœchiométrique ont été supposées respectivement identiques à celles des véhicules essence classique et à injection directe.

Émissions de polluants

Deux types de polluants ont été étudiés :

- les polluants réglementés (HC, NO_x, CO et les particules) ;
- les SO_x.

HC, CO, NO_x

Les valeurs d'émissions à l'échappement des véhicules ayant un moteur thermique et l'hybride du type Prius, sont basées sur les normes Euro 2005. Il est fort probable que ces normes seront plus restrictives en 2050. Cependant, nous verrons ultérieurement qu'elles suffisent, à elles seules, à diminuer de façon très sensible les émissions globales quels que soient les scénarios.

Les véhicules électriques et ceux à pile à combustible alimentés par de l'hydrogène stocké à bord sont considérés comme étant à "zéro émission". Ceux du type "2 en 1" sont considérés comme des véhicules à "zéro émission" sur la part de leur trajet annuel moyen fonctionnant avec le moteur électrique seul et comme des véhicules thermiques sur le reste du parcours.

En ce qui concerne les voitures à pile à combustible alimentées par de l'hydrogène produit à bord à partir de méthanol, nous avons supposé que leurs émissions étaient nulles. On notera que cette hypothèse est forte dans le sens où la production d'hydrogène devrait générer des polluants, notamment durant la phase de démarrage de l'unité. À ce titre, il est intéressant de relever que les niveaux de rejets annoncés par les équipes de

recherche travaillant sur de tels systèmes ne prennent en général pas en compte ces phases les plus néfastes. Pour comparaison, un moteur thermique peut émettre jusqu'à 90 % des HC lors des 200 premières secondes du cycle normalisé.

Particules

Les normes d'émissions pour les véhicules diesel n'existant qu'à partir de 1992, nous avons pris pour base les valeurs calculées par PSA depuis 1974. Entre 2010 et 2020, nous avons intégré progressivement⁶ le filtre à particule (FP) qui permet de réduire les émissions à l'échappement jusqu'à 0,004 g/km (à titre indicatif, la norme EURO 2005 s'élève à 0,025 g/km). Les évolutions des normes pour les particules sont présentées dans la Figure 1.

SO_x

Les émissions de SO_x à l'échappement des véhicules sont directement proportionnelles à la teneur en soufre dans le carburant. Ces teneurs s'élèvent à 50 ppm en 2005, suivant les spécifications établies. Une demande de 10 ppm a été requise par les constructeurs (l'ACEA). En effet, cette faible concentration leur permettrait de réduire (à l'aide du catalyseur De-NO_x), les émissions de NO_x d'un facteur 3. Cependant, cette nouvelle directive risquerait fortement d'engendrer un surcoût et une augmentation des émissions en CO₂, non négligeables pour les

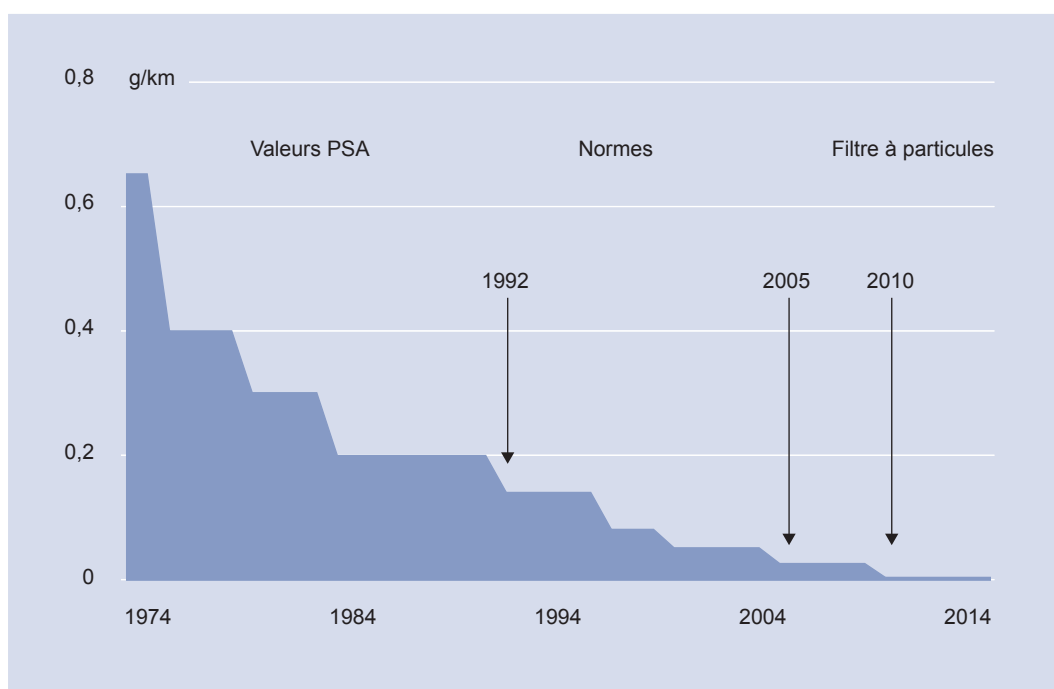


Figure 1
Émissions de particules à l'échappement des véhicules diesel

raffineries. L'incertitude de l'application de cette spécification et le manque de données en terme d'émissions de CO₂ supplémentaires (calculs en

cours à l'IFP) ne nous ont pas permis de prendre en considération cette faible teneur en soufre.

Scénarios d'évolution des parcs automobiles

Dans cette étude, nous avons comparé un scénario de référence "laisser-faire" aux différents scénarios dits "véhicule évolué" (PAC, véhicule hybride, véhicule électrique).

Pour chaque scénario :

- nous avons travaillé avec un kilométrage annuel moyen constant de 13 800 km sur l'ensemble du parc de voitures particulières. Cette moyenne sera donc affectée aux véhicules évolués (à l'exception du véhicule électrique). Le véhicule essence garde un kilométrage constant de 11 000 km/an jusqu'en 2050. Le véhicule diesel, remplaçant progressivement une partie du parc essence, a un kilométrage annuel qui diminue en conséquence. Il passe de 19 000 km/an en 1997 à 17 400 km/an en 2050 ;
- la technologie de l'injection directe ou du mélange stoechiométrique dans le cas du GPL, a été introduite progressivement jusqu'à un remplacement total de l'ancienne technologie en 2008 pour le diesel, 2015 pour le véhicule essence, et 2010 pour le GPL.

Le scénario "laisser-faire"

Pour ce scénario, les parts de marché du diesel évoluent jusqu'à 50 % en 2010, puis restent stables. On remarquera que ce taux permet de satisfaire l'engagement de l'ACEA en 2008 : limitation à 140 g/km de CO₂ en moyenne pour les véhicules neufs. Bien évidemment, ce n'est pas l'unique façon d'atteindre cet objectif (voir Figure 2).

Les scénarios "Véhicule Evolué"

Trois types de scénarios, intégrant chacun une technologie particulière, ont été établis :

- un scénario "véhicule PAC", caractérisé par l'introduction de cette nouvelle technologie à partir de 2015, jusqu'à un pourcentage de 43 % dans le parc de voitures particulières en 2050 (voir Figure 3).
- un scénario "véhicule hybride" marqué par la pénétration de ce type de véhicule à partir de 2005. En 2050, le parc des véhicules hybrides représente 51 % du parc total (voir Figure 4).

• un scénario “véhicule électrique ” avec une pénétration du véhicule électrique identique au scénario “véhicule hybride ”, à la seule différence que les parts de marché restent limitées à 26 % (pourcentage atteint en 2028). Ce scénario, est très favorable aux véhicules électriques, puisqu'ils atteindraient le nombre de 9,5 millions en 2050 (voir Figure 5).

Pour les différents scénarios “véhicule évolué ”, les hypothèses suivantes ont été prises en compte :

- seul le véhicule électrique est doté d'une mission spécifique (cf. §1) ;
- la substitution du véhicule dit “évolué ” aux véhicules essence et diesel se fait de manière indifférenciée ;

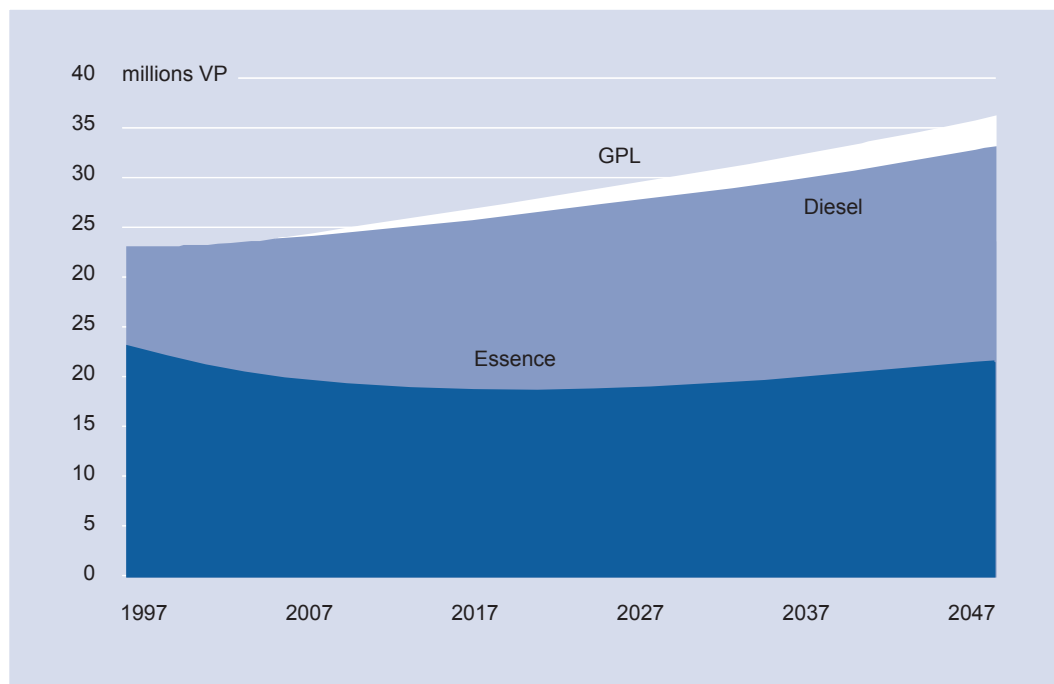


Figure 2
Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "laisser faire"

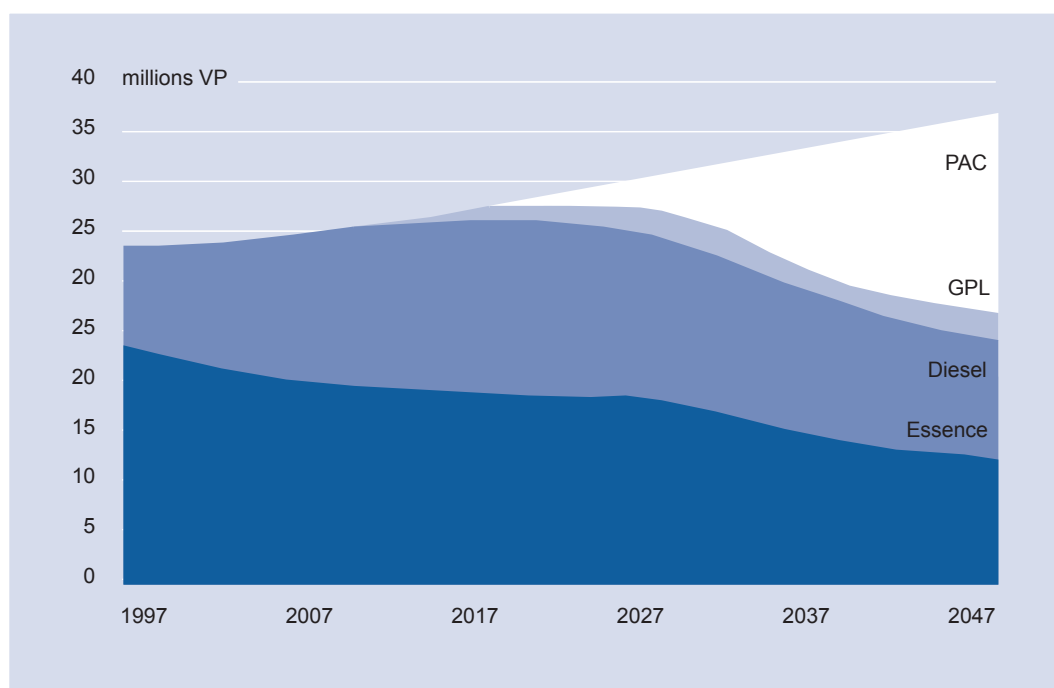


Figure 3
Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "véhicule PAC"

- en supposant les problèmes de coût de production et de technologie résolus, ces voitures seront introduites de façon analogue à la pénétration du véhicule diesel sur la période 1975-1998 (correspondant à une augmentation des parts de marché de 14 % par an en moyenne) ;
- tous les véhicules existants déjà sur le marché ont été introduits à partir de 2005. Seuls les véhicules à pile à combustible pénètrent dans le parc à partir de 2015. En effet, cette technologie nécessite encore aujourd'hui des efforts de recherche importants.

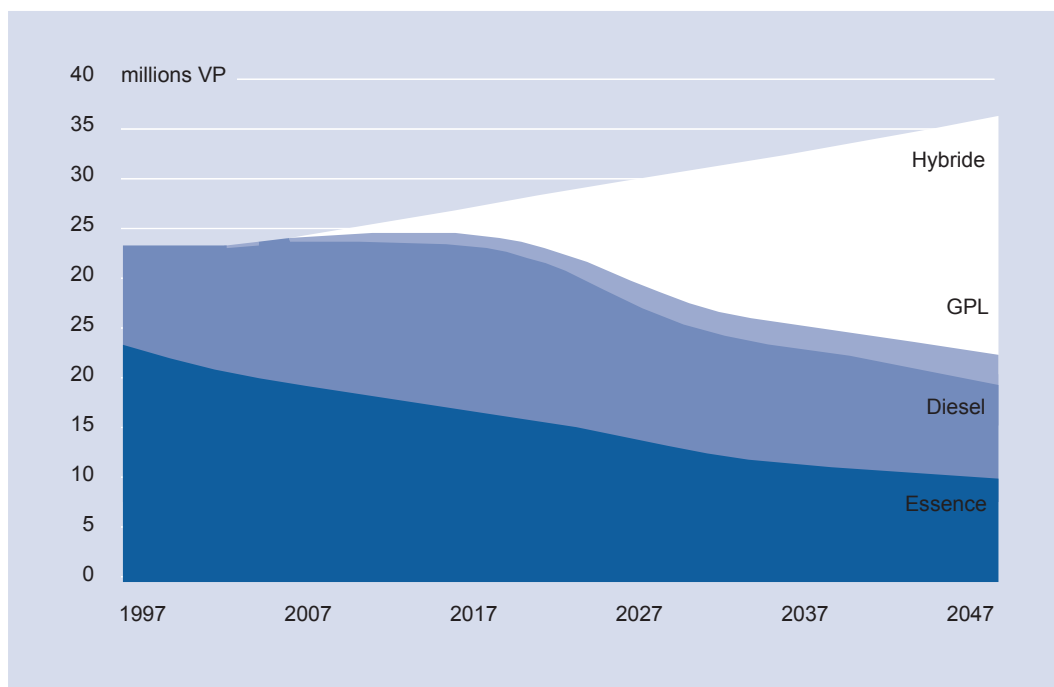


Figure 4

Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "véhicule hybride"

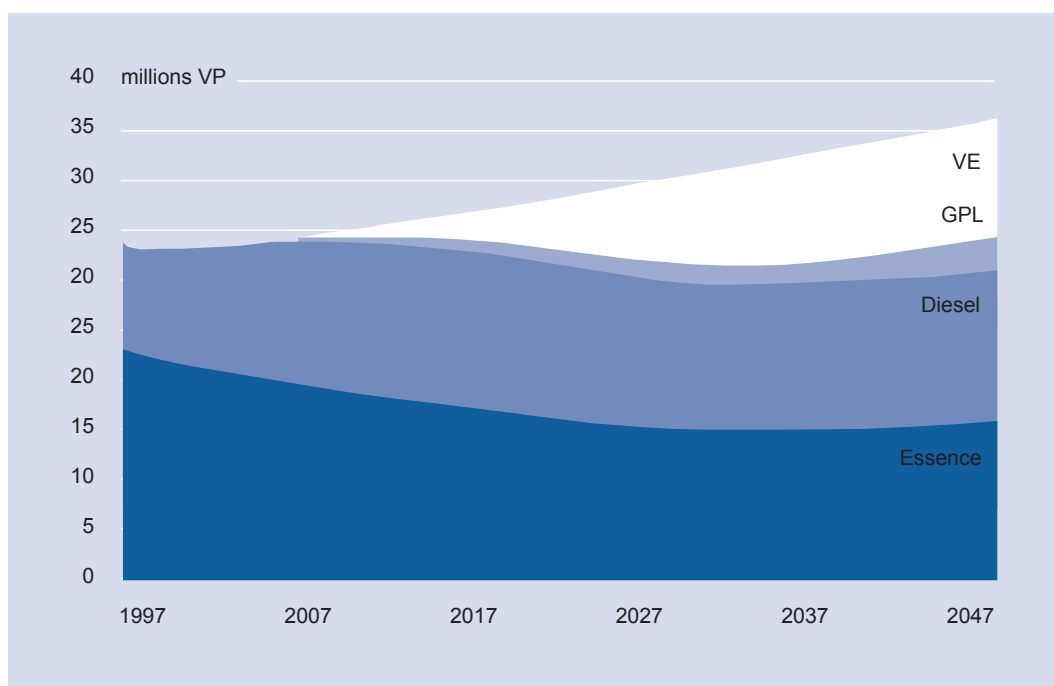


Figure 5

Evolution du parc de voitures particulières selon le scénario "véhicule électrique"

Dans le cas du véhicule électrique, il n'est pas envisageable d'émettre l'hypothèse d'une rupture technologique lui permettant d'être utilisé au même titre qu'un véhicule classique à moteur thermique. En effet, l'autonomie de la batterie et le temps de recharge restent un facteur limitant pour l'utilisateur.

Dans cette optique, le véhicule tout-électrique ne peut être viable que pour une mission de "petits trajets". Dans le cas idéal, son taux maximal de pénétration dans le marché aurait dû être déterminé par le pourcentage de véhicules uniquement utilisés pour des trajets inférieurs à 300 km. Cette étude, trop spécifique, n'a pas pu être effectuée. Nous avons alors repris les résultats de l'enquête Transport de 1993/1994⁷ dont l'objectif était de définir la proportion de véhicules faiblement utilisés par

les ménages. Les résultats ont montré que parmi les véhicules recensés (322), 26 % n'ont jamais parcouru plus de 150 km par jour au cours de l'année de l'étude. La moyenne kilométrique annuelle correspondant à cette catégorie est de 8 500 km.

La base de 150 km de l'étude INSEE est faible par rapport à l'autonomie de 300 km du véhicule électrique que nous considérons dans l'étude. Cependant, une autonomie deux fois plus grande que nécessaire permet de laisser une marge de sécurité à l'utilisateur. De plus, l'observation des déplacements des voitures particulières étant stable au cours des cinq dernières années⁸, nous avons utilisé et considéré comme constants sur la période 2005-2050 les résultats qui découlent de l'étude INSEE (kilométrage annuel moyen de 8500 km et 26 % d'utilisateurs).

Les filières carburants et électriques

Les carburants

Les analyses de cycle de vie des filières carburants sont identiques à celles établies dans les cahiers du CLIP n°9, à l'exception de la filière de production d'hydrogène.

Actuellement, il existe principalement 4 procédés de fabrication d'hydrogène : l'électrolyse, le vaporeformage, l'oxydation partielle et l'autotherme. Nous avons retenu, pour cette étude, la technologie du vaporeformage à partir de gaz

naturel (technologie la plus largement répandue actuellement).

À partir du gaz naturel, l'hydrogène liquéfié est produit aujourd'hui avec un rendement (cf. tableau n°1) de 31 % contre 10 % à partir de l'électrolyse (cf. les cahiers du CLIP n°9). Ce résultat, certes plus intéressant que celui de l'électrolyse, n'en reste pas moins faible par rapport aux autres filières carburants. L'étape de liquéfaction en est la principale cause.

Carburants	Rendements énergétiques de la mise à disposition des carburants	Véhicules	Consommations énergétiques globales des véhicules (kep primaires / 100 km)
Essence 96	86 %	Classique	7.3
		Injection directe	6.3
Diesel 96	91 %	Classique	6.4
		Injection directe	5.05
Essence 2005	82 %	Classique	7.7
		Injection directe	6.6
Diesel 2005	83 %	Classique	7
		Injection directe	5.5
		Hybride type Prius (avant 2015)	4.6
		Hybride type Prius (après 2015)	3
GPL	85 %	Mélange pauvre	7.4
		Mélange stœchiométrique	6.3
Hydrogène liquide ¹	31 %	Pile à combustible	7.4
Méthanol ¹	65 %	Pile à combustible	3.9

Tableau 1

Rendements énergétiques des filières carburants

(1) : à partir de gaz naturel

L' électricité

Nous avons pris en considération les parcs électriques français et européen qui se différencient respectivement par leur part importante en nucléaire et en électricité ex-charbon.

Les technologies

Les tendances actuelles s'orientant vers l'utilisation du gaz naturel, nous avons intégré au cours du temps la technologie du gaz à cycle combiné au détriment du nucléaire en France et du charbon en Europe.

En effet, sous la pression du protocole de Kyoto, qui requiert une réduction de 8 % des émissions de CO₂ en Europe, le gaz à cycle combiné devient une filière de plus en plus attractive, devant celle du charbon. Face aux centrales nucléaires, cette nouvelle technologie ne rivalise, certes pas, du point de vue des émissions de CO₂. Cependant, le nucléaire présente d'autres aspects négatifs qui nous ont conduits à le remplacer partiellement par le gaz naturel CC. En effet, son système de sécurité et les procédés de stockage des déchets radioactifs présentent encore aujourd'hui une part d'incertitudes, qui, aussi faible qu'elle soit, est lourde de conséquences et amène l'opinion publique à rejeter cette filière. En ajoutant à ces contraintes, le fait que la fin de vie des centrales nucléaires en France est prévue pour les années 2010-2020 et que le coût d'installation de telles structures est lourd, nous avons estimé un développement important du gaz naturel CC.

Dans le tableau 2, sont comparées les filières de production d'électricité à partir du Cycle Combiné appliqué au gaz naturel, de la turbine à Gaz (TAG), de la Turbine à Vapeur (TAV), du charbon et du charbon propre. Nous pouvons ainsi noter que le gaz naturel CC permet, non seulement, d'améliorer le rendement des TAG de 30 %, mais de réduire les émissions de NO_x à 9 ppm/kWh_e, ainsi que celles liées au soufre qui est, contrairement au charbon, quasi-inexistant dans le gaz naturel. Face à de telles performances, le charbon propre ne peut rivaliser, sur

tout en termes d'émissions de CO₂. C'est pourquoi, cette filière disparaît progressivement dans les scénarios pour laisser place à cette nouvelle technologie.

Pour des raisons économiques et de performances, nous n'avons pas tenu compte des TAV (turbines à vapeur) dans les scénarios. En effet, les TAG ont connu ces dernières années des progrès technologiques importants qui les rendent aujourd'hui aussi performantes que les TAV et plus appropriées au gaz naturel. De plus, leur coût d'installation est plus avantageux. A titre indicatif, le coût d'investissement d'un cycle combiné (500 à 700 \$/kW) est le double de celui d'une TAG, mais la moitié de celui d'une centrale à vapeur conventionnelle⁹.

Scénarios d'évolution des parcs électriques

Le scénario européen (cf. figure 6) a été bâti à partir d'un ouvrage de la Commission Européenne¹⁰.

En 1998, le parc européen était principalement composé des filières gaz naturel (11 % dont 4,5 % en CC), charbon (31 %, pas de charbon propre), nucléaire (36 %) et hydraulique (12 %). Sur la période 2000-2030, la part du nucléaire décroît assez rapidement jusqu'à 17 %, puis plus lentement jusqu'en 2050. Le charbon, par contre, ne rencontre pas de phase de stabilisation et est remplacé progressivement par le gaz naturel CC pour finir à une part de 5 % en 2050. À cette date, la nouvelle technologie représente alors 69 % du parc électrique européen.

L'introduction du gaz naturel CC en France a été inspirée des scénarios établis par le Commissariat Général au Plan¹¹, dans l'hypothèse de durée de vie de 40 ans des centrales nucléaires.

En 2020 le parc électrique français¹² (cf. figure 7) est composé principalement des filières gaz naturel CC (6 %), hydraulique (15 %), et nucléaire (73 %, contre 80 % aujourd'hui). À partir de cette date, les centrales atteignant leur fin de vie, deux voies sont envisageables :

soit nous optons pour le scénario dit "société de marché" : le parc nucléaire n'est pas renouvelé

Tableau 2

Émissions et rendements des procédés thermiques de production d'électricité
Source : EDF

(1) General Electric : Turbine à gaz type LM 6000

(2) General Electric : Turbine à gaz naturel CC type 9H

	Rendement (%)	CO2 (g/kWh)	SO2 (g/kWh)	NOx (g/kWh)	HC (g/kWh)	CO (g/kWh)
Gaz Naturel						
Turbine à Combustion(1)	41	520	0,004	0,2	0,04	0,075
Turbine à Vapeur	42	507	0,004	1,84	0,0786	0,043
Cycle Combiné(2)	60	340	0	0,074	0,04	0,075
Charbon						
Conventionnel	38	927	5,06	3,017	0,015	0,08
Propre	50	682	0,373	0,222	0,011	0,059

et disparaît dans sa quasi-totalité pour laisser place au gaz naturel CC ;
soit nous envisageons un scénario dit d " état industriel ", où l'état intervient dans le domaine économique et industriel pour une industrie compétitive et stable à long terme. Le parc nucléaire est alors reconstruit afin d'assurer la consommation de base.

Le scénario "société de marché " se rapprochant du scénario établi pour le parc électrique européen, nous avons retenu pour le parc électrique français, les options du scénario "État industriel ". La hausse de la demande d'électricité étant assurée par une production issue du gaz naturel, le parc nucléaire, dimensionné uniquement pour la consommation de base, décroît

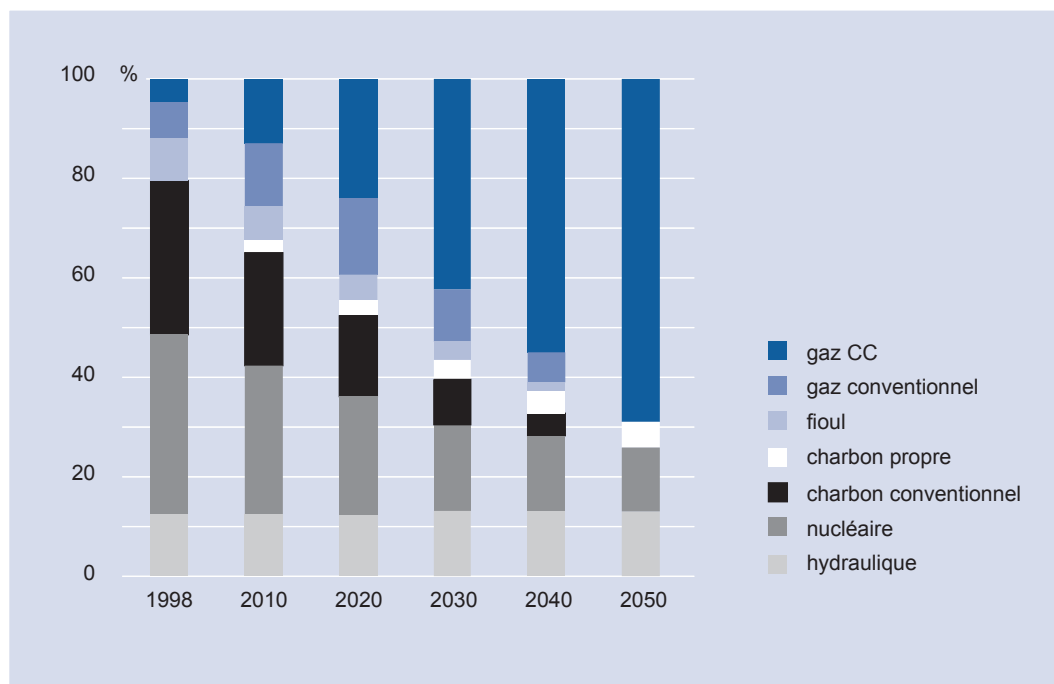


Figure 6
Évolution du parc électrique européen

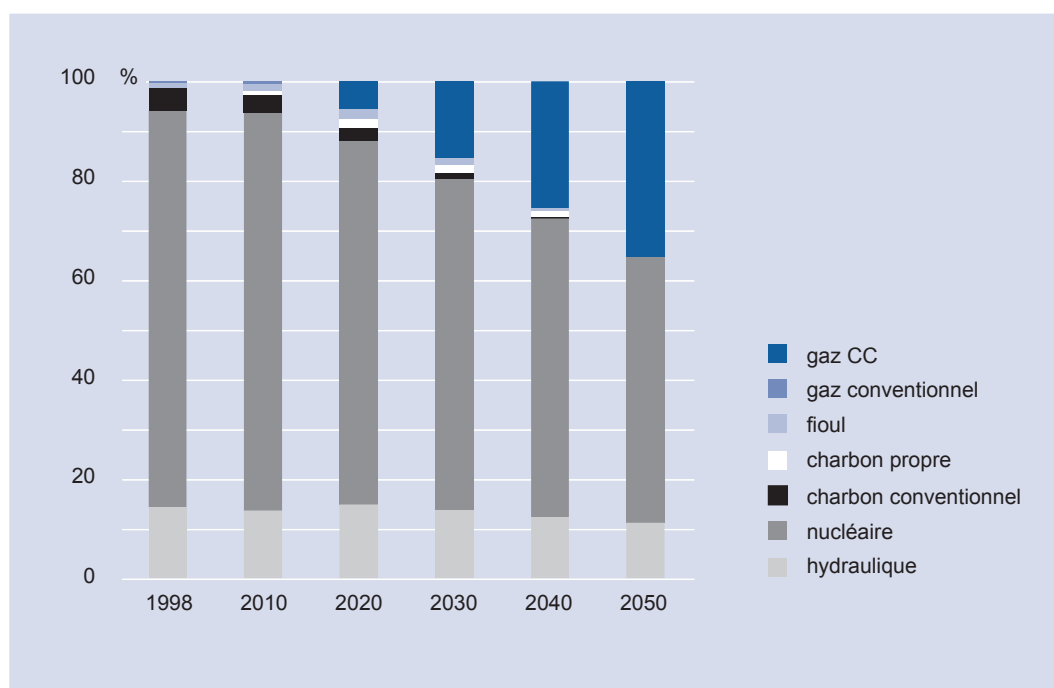


Figure 7
Évolution du parc de production d'électricité en France

progressivement jusqu'à 53 % en 2050, pour une proportion de gaz naturel CC de 35 %, le reste de la répartition (12 %) représentant la filière hydraulique. Le charbon, peu utilisé en 2000 (4,5 %), disparaît complètement en 2050.

Dans chaque scénario, le fuel a été négligé pour des raisons de simplification. Il est évident qu'il sera exploité dans les années à venir, d'autant plus que la production d'électricité par le procédé IGCC dans les raffineries représente une des solutions de reconversion du fuel lourd¹³. Cependant, nous considérons son influence sur le parc électrique comme négligeable.

Émissions de CO₂ et rendements

Les résultats globaux des émissions et des rendements des filières de production d'électricité et de leurs évolutions sont donnés dans le tableau 3 et illustrés par les figures 8 et 9.

Il est important de remarquer que les performances des parcs électriques représentatifs des situations française et européenne (cf. figures 8 et 9 et tableau

3) ont tendance à se rejoindre en termes d'émissions de CO₂. Cette évolution est le résultat de l'hypothèse forte, faite dans les deux situations, d'une utilisation accrue du gaz naturel comme source primaire d'énergie soit aux dépens du nucléaire (pour la France) soit aux dépens du charbon (pour l'Europe). L'introduction de cycle combiné à base de gaz naturel favorise dans les deux cas le rendement énergétique (augmentation de 44 % en Europe et 14 % en France), alors qu'il provoque une augmentation des émissions de CO₂ en France (de 112 %, contre une chute de 30 % pour l'Europe). Impact de la structure du parc de production d'électricité sur la consommation des véhicules électriques et hybride type "2 en 1".

Les figures 10 et 11 fournissent les évolutions des consommations des véhicules électriques alimentés par le réseau français ou européen.

En 2050, les émissions de CO₂ des véhicules électriques français et européen sont respectivement de 83 % et 75 % plus faibles par rapport à celles d'un véhicule essence à injection directe (fig. 9 et 10).

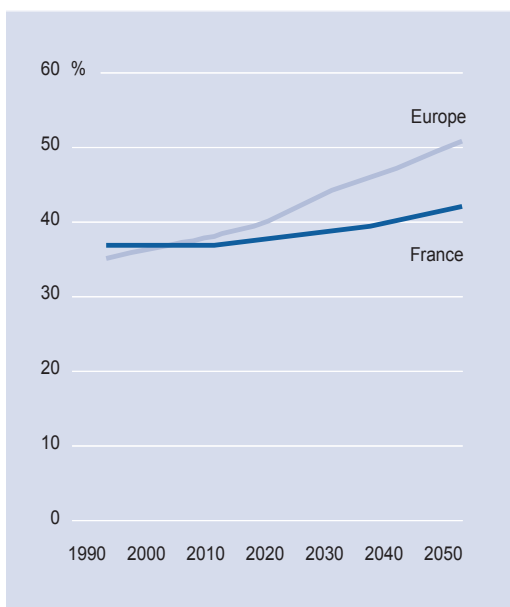


Figure 8

Rendements des parcs électriques

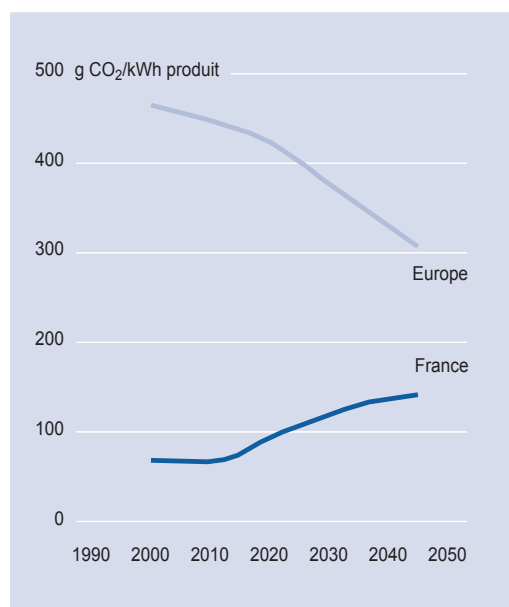


Figure 9

Émissions de CO₂ des parcs électriques

g/kWh	1995		2010		2030		2050	
	Europe	France	Europe	France	Europe	France	Europe	France
CO ₂	468	67	446	67	384	103	307	141
NO _x	1,45	0,21	1,19	0,20	0,66	0,13	0,17	0,09
HC	1,83	0,27	1,59	0,27	1,11	0,30	0,71	0,30
CO	0,14	0,06	0,15	0,06	0,16	0,08	0,16	0,09
SO ₂	2,23	0,35	1,67	0,32	0,74	0,17	0,06	0,03
CH ₄	1,57	0,23	1,37	0,21	0,98	0,25	0,67	0,27
Particules	0,42	0,09	0,31	0,08	0,15	0,05	0,04	0,03
Rendement	0,35	0,37	0,38	0,37	0,45	0,40	0,51	0,42

Tableau 3

Émissions et rendements des parcs électriques européen et français (sorties centrales)

Leurs consommations d'énergie sont respectivement de 45 % et 54 % inférieures à celles du même véhicule de référence. Ces résultats s'expliquent autant par la faible consommation choisie pour le véhicule électrique, que par les évolutions des caractéristiques des parcs de production d'électricité (utilisation accrue du gaz naturel en cycle combiné).

Les figures 12 et 13 donnent les évolutions des émissions de CO₂ et des consommations d'énergie primaire des véhicules hybrides "2 en 1" considérés dans l'étude.

Les différences que l'on peut observer entre les véhicules électriques "français" et "européen" sont

moins significatives que lorsque l'on compare les véhicules hybrides "2 en 1" français et européen (fig. 12 et 13). À l'horizon 2050, ces véhicules hybrides sont aussi performants que les en terme de consommation énergétique (gain de 48 % par rapport au véhicule essence à injection directe) mais n'atteignent pas son faible taux d'émissions de CO₂ (seulement 57 % de réduction par rapport au véhicule essence à injection directe). En effet, ces véhicules profitent moins de l'amélioration de la production d'électricité que le véhicule électrique du fait d'une moindre ponction sur le réseau.

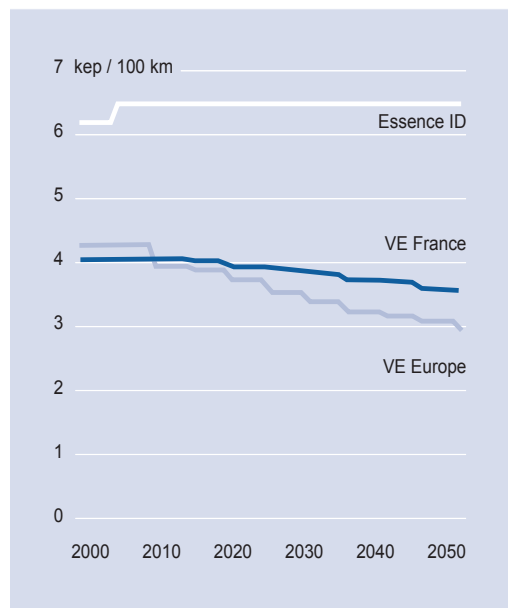
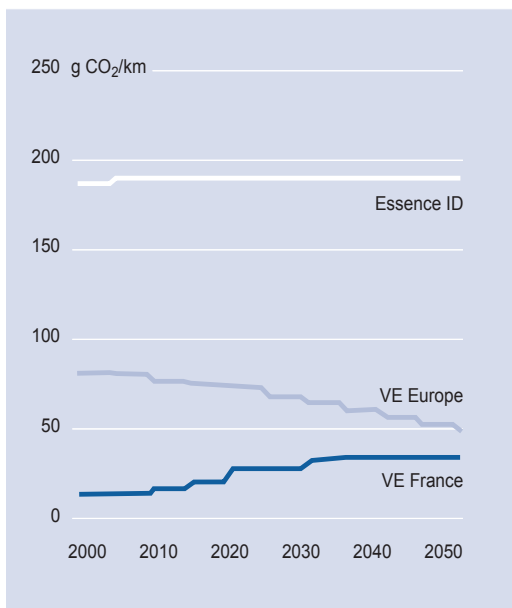


Figure 10

Émissions de CO₂ du véhicule électrique sur l'ensemble de la filière

Figure 11

Consommation d'énergie primaire du véhicule électrique

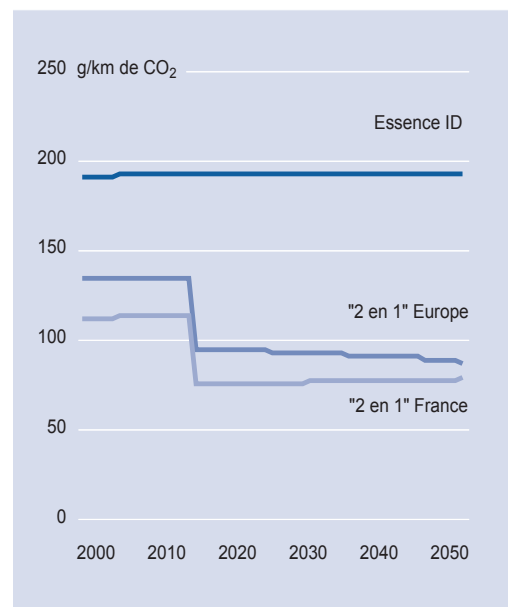
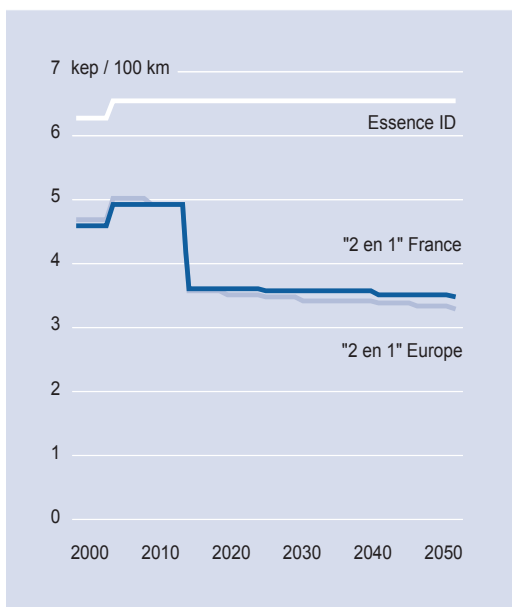


Figure 12

Consommation primaire d'énergie du véhicule hybride "2 en 1" sur l'ensemble de la filière

Figure 13

Émissions de CO₂ du véhicule hybride "2 en 1" sur l'ensemble de la filière

Analyses des résultats

Émissions de CO₂ et consommation d'énergie

Analyse des émissions de CO₂ et des consommations énergétiques des différents scénarios

Le scénario "laisser-faire"

Les figures 14 et 15 fournissent les évolutions des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie du parc automobile Français.

A la lecture de ces graphes, deux remarques peuvent être faites :

- l'apparition de pics en 2000 et 2005 qui s'explique par la mise en distribution progressive de carburants à 50 ppm de soufre (50 % en 2000 et 100 % en 2005). Cette spécification entraîne, en effet, une surconsommation énergétique globale de 6 % et une augmentation des émissions de CO₂ de 3 %.

- les efforts mis en œuvre pour réduire les consommations de véhicules à combustion interne sont observables jusque dans les années 2020, mais ils ne suffisent pas, à l'horizon 2050, à compenser la croissance du parc automobile (39 % sur la période 2000-2050) et les effets négatifs liés à la nouvelle spécification de teneur en soufre dans les carburants.

Ainsi, ces deux facteurs engendrent, dans le cas d'un scénario "laisser-faire", une surconsommation énergétique de 22 % et une augmentation des émissions de CO₂ de 17 % par rapport au parc de voitures particulières actuel. Ces premiers résultats montrent donc l'intérêt de l'introduction de nouvelles technologies de véhicules plus performantes.

Figure 14
Emissions de CO₂ du scénario "laisser-faire"

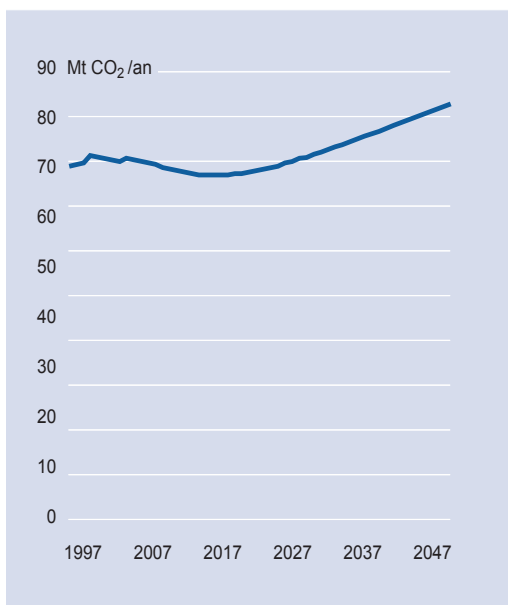
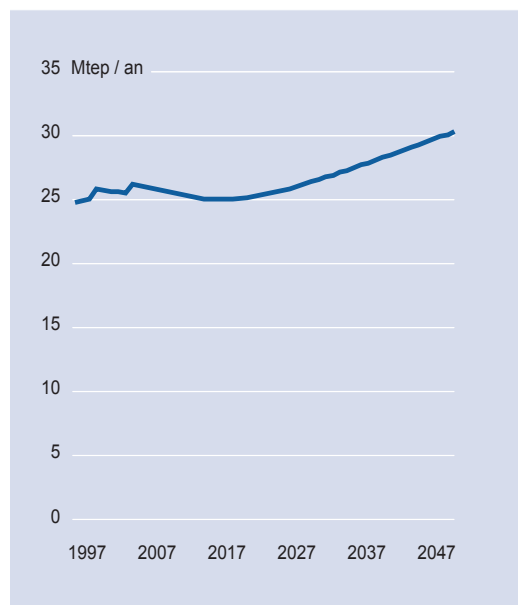


Figure 15
Consommation d'énergie du scénario "laisser-faire"



Les scénarios "véhicule évolué" (parc de production d'électricité français)

Pour mieux visualiser les résultats, les figures 16 et 17 ne comprennent pas les scénarios faisant intervenir le parc électrique européen. Une comparaison des conséquences de la structure du parc de production d'électricité sur les bilans

énergétiques et d'émissions de CO₂ des parcs automobiles fait l'objet du chapitre 3.1.2.

À l'analyse de ces courbes, on peut distinguer quatre catégories dans l'ensemble des technologies étudiées :

- le véhicule "très haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre

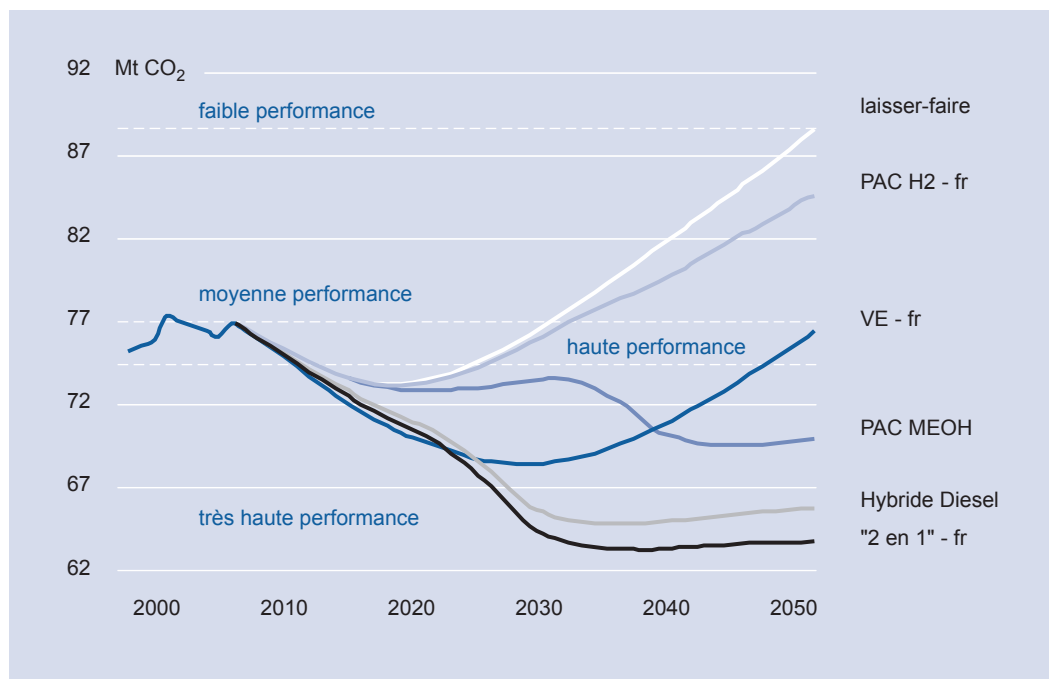


Figure 16
Émissions de CO₂ des différents scénarios

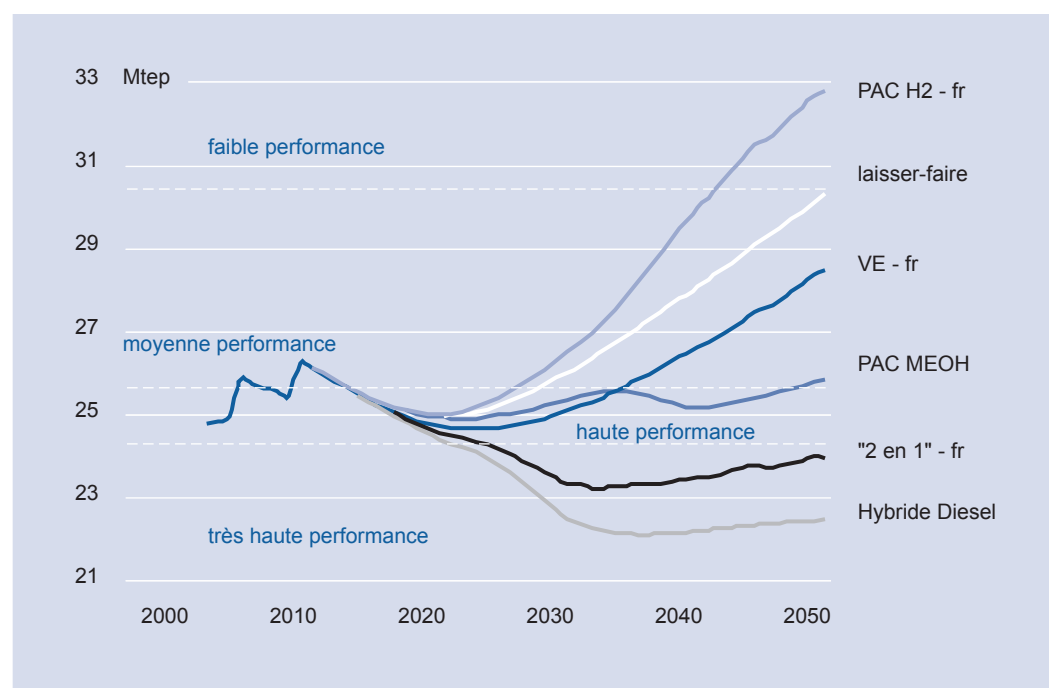


Figure 17
Consommation d'énergie des différents scénarios

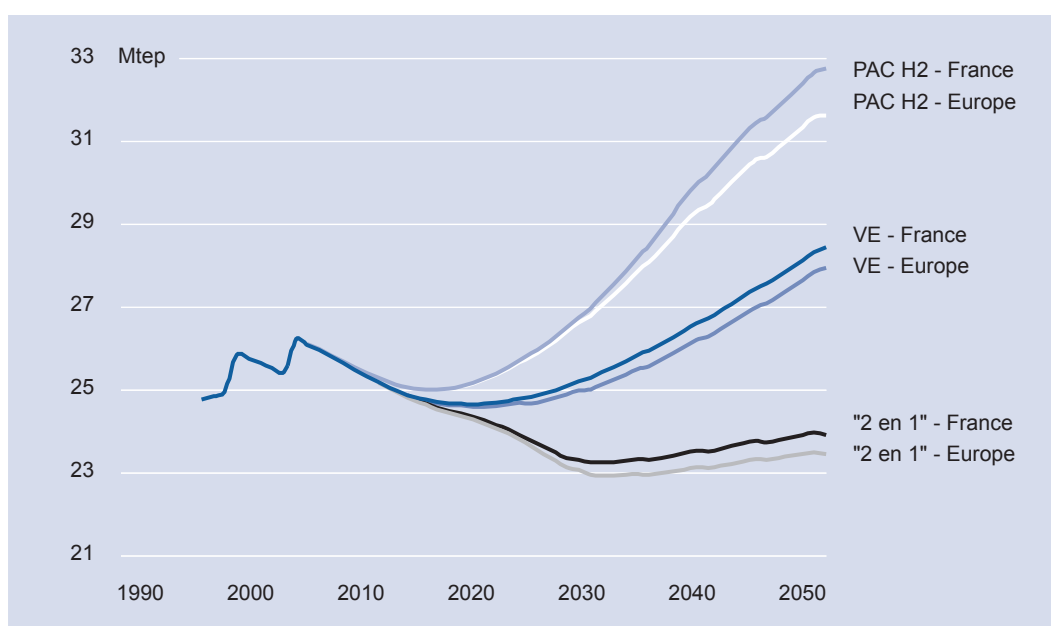
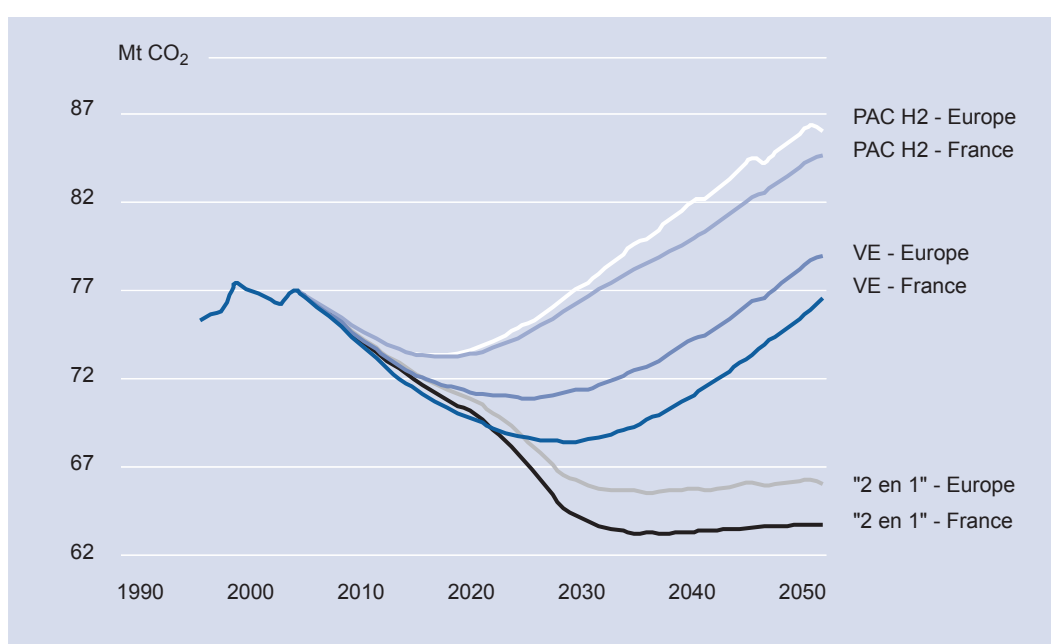
de meilleur bilan (CO₂, énergie) en 2050 que celui d'aujourd'hui ;

- le véhicule "haute performance" dont l'introduction dans le parc automobile permet de maintenir un bilan (CO₂, énergie) invariant entre les valeurs d'aujourd'hui et celles en 2050 ;
- Le véhicule "moyenne performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (CO₂, énergie) plus performant que celui du scénario "laisser-faire" en 2050, mais ne permet pas de maintenir les valeurs du bilan (CO₂, énergie) d'aujourd'hui ;

- Le véhicule "faible performance" dont l'introduction dans le parc automobile engendre un bilan (CO₂, énergie) plus mauvais que celui du scénario "laisser-faire" en 2050.

D'après ces paramètres, nous obtenons alors le tableau de classification n°4.

L'analyse des résultats révèle l'introduction des véhicules hybrides dans le parc automobile comme la solution la plus efficace pour la réduction simultanée des émissions de CO₂ et de la consommation d'énergie. Ils font, en effet, partie de la catégorie "très haute performance" dans



les deux cas. Leurs gains en énergie, par rapport au scénario "laisser-faire" en 2050, atteignent 26 %, 22 % et 21 %, respectivement pour les hybrides "type Prius", "2 en 1" européen et "2 en 1" français, contre 15 % pour la PAC MeOH. Les gains d'émissions de CO₂ atteignent 28 % ("2 en 1" français) et 25 % (type "Prius", "2 en 1" européen), contre 21 % pour la PAC MEOH, et 13,6 % pour le véhicule électrique "français".

Ces performances s'expliquent par l'avantage que possède le véhicule hybride en bénéficiant à la fois des progrès technologiques des batteries et des moteurs à combustion interne, tout en possédant le confort d'utilisation d'un véhicule essence ou diesel. Il peut donc entrer dans le marché sans contrainte spécifique à partir de 2005.

Malgré une introduction tardive dans le parc automobile, la PAC MeOH parvient au niveau "très haute performance" en termes d'émissions de CO₂ grâce à son rapport C/H favorable par rapport à celui du pétrole. Cet avantage lui permet ainsi de "sauter une classe" lorsqu'on passe du bilan énergétique au bilan CO₂.

Quant aux résultats de la PAC H₂, ils sont considérablement affectés par l'importante quantité d'énergie nécessaire à l'étape de liquéfaction et, dans une moindre mesure, à la production de l'hydrogène qui entraînent, en conséquence, une hausse sensible des émissions de CO₂.

Malgré sa mission restrictive, le véhicule électrique "français" offre la plus forte réduction d'émissions de CO₂ en 2020 (-5 % par rapport au scénario "laisser-faire"). Par la suite, ce niveau n'est plus maintenu du fait de la croissance du parc et de la limitation de ses parts de marché.

En dépit de sa faible consommation électrique, le véhicule électrique ne présente pas d'aussi bons résultats pour le bilan énergétique. Il est, en effet, tributaire des filières électriques dont les rendements sont faibles par rapport aux filières carburants.

Influence de la filière électrique sur les bilans des émissions de CO₂ et des consommations énergétiques des différents scénarios intégrant une partie électrique.

Les figures 18 et 19 mettent en évidence l'influence des filières de production d'électricité sur les bilans d'émissions de CO₂ et de consommations énergétiques des différents scénarios intégrant une partie électrique. Les résultats de ces illustrations sont ensuite répertoriés dans le tableau 5.

Pour les scénarios véhicule électrique et véhicule hybride "2 en 1", l'origine de l'électricité n'est notable qu'en termes d'émissions de CO₂. Cette différence, en effet, s'élève à 3 % en faveur du parc électrique français en 2050. Aussi est-il intéressant de souligner qu'elle s'élève à 4 % en 2030 pour le véhicule électrique. Cette dernière diminue progressivement jusqu'en 2050 parce que ses parts de marché restent figées dans un parc automobile qui ne cesse de croître.

Dans le cas de la PAC H₂, le phénomène inverse est observé. La différence entre les scénarios électriques n'est perceptible qu'en terme de consommation énergétique : elle est de 3,6 % en faveur du parc électrique européen. Ceci s'explique par le fait que la partie électrique n'intervient que lors de l'étape de liquéfaction de l'hydrogène.

	CO2	Consommation d'énergie
Hybride type "Prius"	Très Haute Performance	Très Haute Performance
Hybride "2 en 1" - fr	Très Haute Performance	Très Haute Performance
VE - fr	Haute Performance	Moyenne Performance
PAC MeOH	Très Haute Performance	Moyenne Performance
PAC H2l-fr	Faible performance	Moyenne Performance

Tableau 4

Classification des véhicules selon leurs performances

	2030	2050
CO2		
VE	-3,9 %	-3,1 %
PAC H2l	-1,0 %	-1,6 %
2 en 1	-3,0 %	-3,4 %
Energie		
VE	+1,1 %	+1,8 %
PAC H2l	+0,7 %	+3,6 %
2 en 1	+1,2 %	+2,0 %

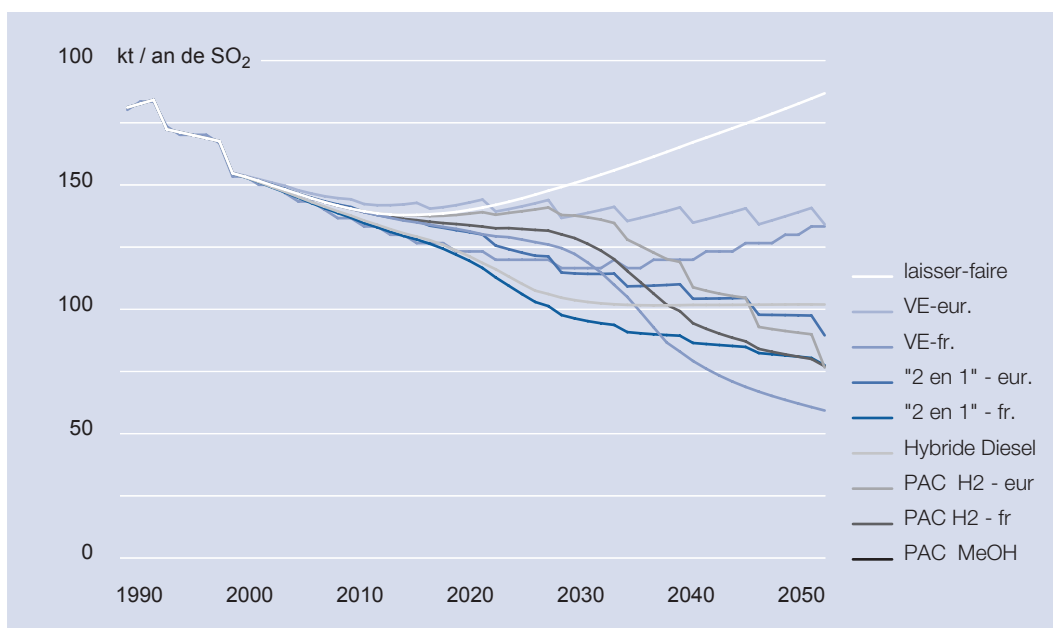
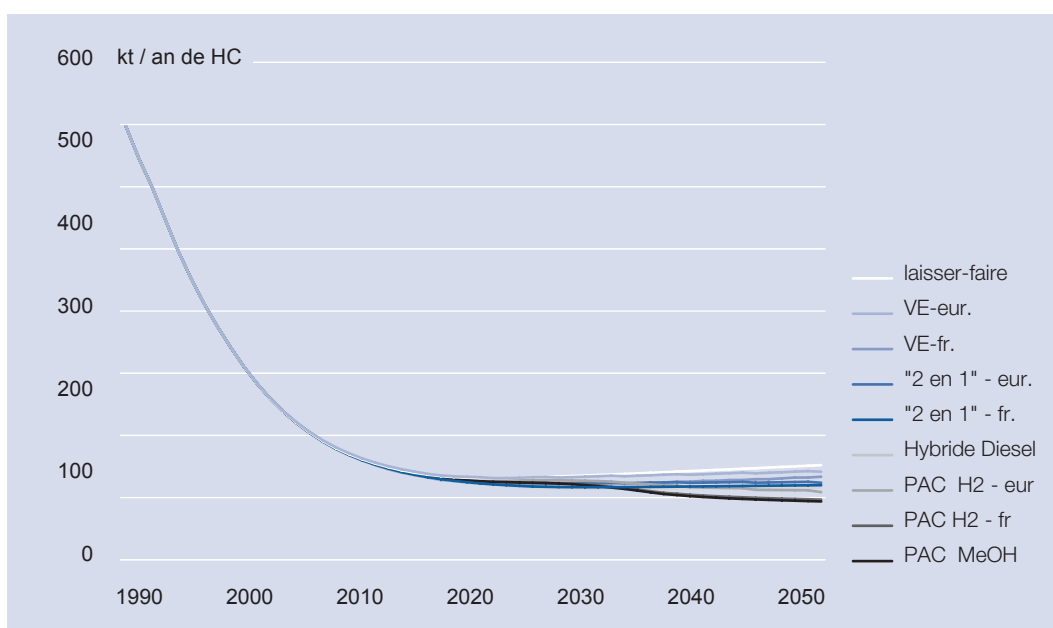
Tableau 5

Comparaison entre les scénarios français et européen en termes d'émissions de CO₂ et de consommation d'énergie

Pollution locale

L'ensemble des émissions de polluants réglementés étudiés se comportant d'une manière similaire, seules sont données ici sur la figure 20 les émissions d'HC. Les courbes correspondant aux autres polluants se trouvent en annexe 3. Elles révèlent toutes une chute très nette des émissions locales à partir de 2015 (réduction de 70 à 80 %), résultant de l'application de la norme Euro 2005.

Les émissions de SO₂ se comportent très différemment car elles proviennent essentiellement des filières de production des carburants. Elles sont, en effet, à l'origine de l'étape de désulfuration des produits pétroliers, ou de la combustion de matières fossiles destinée à la production d'électricité. En revanche, le même comportement que sur la figure 20 est observé lorsqu'on ne prend en compte que les émissions de SO₂ à l'échappement des véhicules.



Conclusion

L'étude montre que la mise en place de la norme Euro 2005 a pour conséquence une nette réduction (75 %) de la pollution locale et régionale à partir de 2015 quels que soient les scénarios établis. Cependant, la méthodologie utilisée ne permettant pas d'analyser les phénomènes régionaux, les résultats indiquent uniquement une baisse sensible des émissions de polluants locaux qui devrait avoir pour conséquence la diminution de l'intensité et de la fréquence des alertes à la pollution dans les centres urbains.

Le défi pour les années à venir repose principalement sur le contrôle des émissions de CO₂ et des dépenses d'énergie. C'est à ce niveau que les scénarios établis se différencient.

D'après les résultats, nous avons pu constater que le véhicule électrique français offre un fort potentiel de réduction des émissions de CO₂. En dépit de son faible kilométrage annuel, il permet à court terme de très bonnes performances. Jusqu'en 2020, le scénario véhicule électrique présente, en effet, le meilleur gain en termes d'émissions de CO₂ par rapport au scénario "laisser-faire". À long terme, ses parts de marché étant limitées, il parvient tout juste à faire face à la croissance du parc et engendre ainsi un gain de 13,6 % par rapport au bilan CO₂ du scénario "laisser-faire". Il reste à remarquer que ces derniers résultats sont tributaires du mode d'introduction dans le parc qui peut paraître optimiste avec une part de marché plafonnée à 26 % à partir de 2028. Cependant en 2020, les véhicules électriques représentent dans le scénario établi un pourcentage de 10 % dans le parc automobile. Ce chiffre n'est pas excessif comparé aux exigences du CARB en Californie auprès des grands constructeurs automobiles : 10 % des véhicules vendus en 2003 devront être des "ZEV" (zero emission vehicle).

En ce qui concerne le bilan énergétique, le véhicule électrique "français" (rechargé sur le réseau français) n'offre pas le même potentiel. En effet, sa faible consommation électrique à l'utilisation ne lui permet pas de compenser les rendements des filières électriques. Ainsi, sa pénétration dans le parc de véhicules particuliers ne contrebalance pas la croissance du trafic, mais engendre tout de même un gain énergétique de 8 % par rapport au scénario "laisser-faire" en 2050.

La production d'électricité européenne, basée principalement sur la combustion de matières fossiles, engendre pour le véhicule électrique un taux d'émissions de CO₂ plus élevé que dans le cas du véhicule électrique "français". La différence entre les bilans CO₂ des scénarios véhicule électrique "européen" et "français" est de 3 % en faveur du scénario français. Quant à la différence entre les bilans énergétiques, elle est négligeable (1 % en faveur du scénario européen).

Le problème du véhicule électrique n'est pas tant celui de l'autonomie (même si cette dernière est souvent bien plus faible dans la réalité que celle avancée par les constructeurs), mais celui du temps de recharge. En effet, un utilisateur pourrait très bien parcourir plusieurs centaines de kilomètres avec un véhicule électrique en s'arrêtant tous les 200 km, à condition que le temps d'alimentation de son véhicule soit de l'ordre de la minute. À l'heure actuelle, il ne paraît cependant pas envisageable, dans la limite des connaissances scientifiques, de réduire ces temps de recharge (même à 80 %) à cet ordre de grandeur. Un système basé sur l'échange de batterie serait alors une solution de recours complémentaire aux stations de recharge rapide. Il implique, malgré tout, une infrastructure et une logistique très lourdes à mettre en place.

Quant à l'introduction de la PAC H₂ dans le parc de voitures particulières, le faible rendement et les émissions élevées de CO₂ liés à la liquéfaction de l'hydrogène rendent son influence sur le parc quasi-nulle : le scénario PAC H₂ est alors pratiquement identique au scénario "laisser-faire". Cette tendance pourrait cependant être renversée par une rupture technologique, notamment sur le système de stockage (nanotubes de carbone ?...).

Dans l'état actuel des recherches, il serait donc préférable, pour une application des piles à combustible au transport, d'envisager un autre carburant facile à stocker, et produire l'hydrogène à bord du véhicule. La voie méthanol permet, par exemple, d'améliorer de façon sensible les émissions de CO₂ et les consommations énergétiques par rapport au scénario "laisser-faire".

Cependant, il ne faut pas oublier que les PAC MeOH présentent aujourd'hui au moins 4 principales difficultés.

En ce qui concerne le méthanol :

- celui de sa toxicité qui est un véritable obstacle pour un développement grand public notamment au vu des problèmes rencontrés par le MTBE en Californie ;
- celui de la réactualisation des filières de production de méthanol en fonction de la demande qu'engendrerait la mise sur le marché des PAC MeOH. En effet, la production actuelle de l'alcool primaire pourrait alimenter moins de 5 % du parc automobile mondiale de véhicules particuliers.

En ce qui concerne le système de production d'hydrogène embarquée :

- le temps de démarrage du procédé de production d'hydrogène qui s'élève aujourd'hui à un ? d'heure ;
- enfin, l'élimination des traces de CO produites en régime transitoire du réformeur. En effet, cette présence chimique dans la pile à combustible détériore le rendement du système.

Au vu des résultats, les véhicules hybrides apparaissent les plus performants aussi bien en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre que d'économie d'énergie. Toutefois, il faut noter que les données actuelles sur ces différents types d'automobiles ne permettent pas de trancher nettement entre les stratégies de couplage des deux moteurs (option "2 en 1" ou type "Prius").

Finalement, une des principales conclusions suggère une introduction massive du véhicule hybride dans le parc de voitures particulières, dès 2005. Trois points encouragent cette voie. Il bénéficie tout d'abord des progrès sur les moteurs thermique et électrique ; il n'implique pas la mise en place d'une distribution de carburant particulière ; et enfin, il ne suppose pas une modification complète de l'appareil industriel de production. Le seul point faible qui subsiste est l'épuisement, à plus long terme, des réserves de pétrole.



Annexes

Annexe 1
Tableaux comparatifs des performances des véhicules et des batteries

Annexe 2
Calcul des consommations électriques

Annexe 3
Résultats

Annexe 1 Tableaux comparatifs des performances des véhicules et des batteries

	Énergie spécifique (Wh/kg)	Auto-décharge (après 2 jours) (%)	Efficacité de recharge (%)	Temps de recharge (Heures)
Lead Acid	31	5	77	8
Ni-Cd	50	30	72	5
Li-Ion	90	10	80	4
Li-SP (Solid Polymer)	120	?	95	5

Source : Atkin Graham and Storey Jonathan, "Electric Vehicles : Prospects for Battery-, Fuel Cell- and Hybrid-Powered Vehicles", 1998

Type de véhicule	Motorisation
Hybride type PRIUS	Moteur thermique (à injection directe) à assistance électrique (pas de ponction sur le réseau électrique)
"Deux en un"	Double motorisation (moteur thermique à injection directe, batterie au lithium) avec ponction sur le réseau
Tout électrique	Moteur électrique seul. Batterie au Lithium-Ion.
PAC H2I	Pile à combustible
PAC méthanol	Pile à combustible
Diesel ID	Moteur à combustion interne par compression
Diesel classique	Moteur à combustion interne par compression
GPL mélange pauvre	Moteur à combustion interne par allumage
GPL mélange stœchiométrique	Moteur à combustion interne par allumage
Essence ID	Moteur à combustion interne par allumage
Essence classique	Moteur à combustion interne par allumage

Type de véhicule	Carburant	Particularités	Consommations* kep/100 km	2015* kep/100 km
Hybride type PRIUS	diesel		3,8 (a)	2,46 (i)
"Deux en un"	diesel		3,5 (a)	2,46 (i)
Tout électrique		Autonomie de 300 km Temps de recharge de une heure	1,54 (h)	
PAC H2I	H2I fabriqué à partir du gaz naturel et liquéfié.		2,31 (f)	
PAC méthanol	Méthanol fabriqué à partir de gaz naturel		2,53 (f)	
Diesel ID			4,6 (b)	
Diesel classique			5,8 (c)	
GPL mélange pauvre			6,3 (d)	
GPL mélange stœchiométrique			5,4 (e)	
Essence ID			5,4 (g)	
Essence classique			6,3 (c)	

a) cf. calcul §II.1

b) calculé en appliquant un gain de 20 % sur la consommation du véhicule diesel classique

c) moyenne SECODIP

d) identique à la consommation du véhicule essence

e) identique à la consommation du véhicule essence ID

f) Cf. Les cahiers du CLIP n°9

g) calculé en appliquant un gain de 15 % sur la consommation du véhicule essence classique

h) Cf. §II.1 et annexe n°2

i) hypothèses de consommation de l'étude des cahiers du CLIP n°9

Source : Atkin Graham and Storey Jonathan, "Electric Vehicles : Prospects for Battery-, Fuel Cell- and Hybrid-Powered Vehicles", 1998

Annexe 2 Calcul des consommations électriques

Calcul

$$F_{\text{Wh/km}} = K * (F_{\text{Wh/t km, consommation spécifique}} * M_t, \text{ masse moyenne} / e \text{ efficacité de recharge})$$

Avec :

$$F_{\text{Wh/t km, consommation spécifique}} = 0,021V^2 - 2,928V + 178,55$$

$M = 1,5 \text{ t}$, masse moyenne d'un véhicule électrique actuel

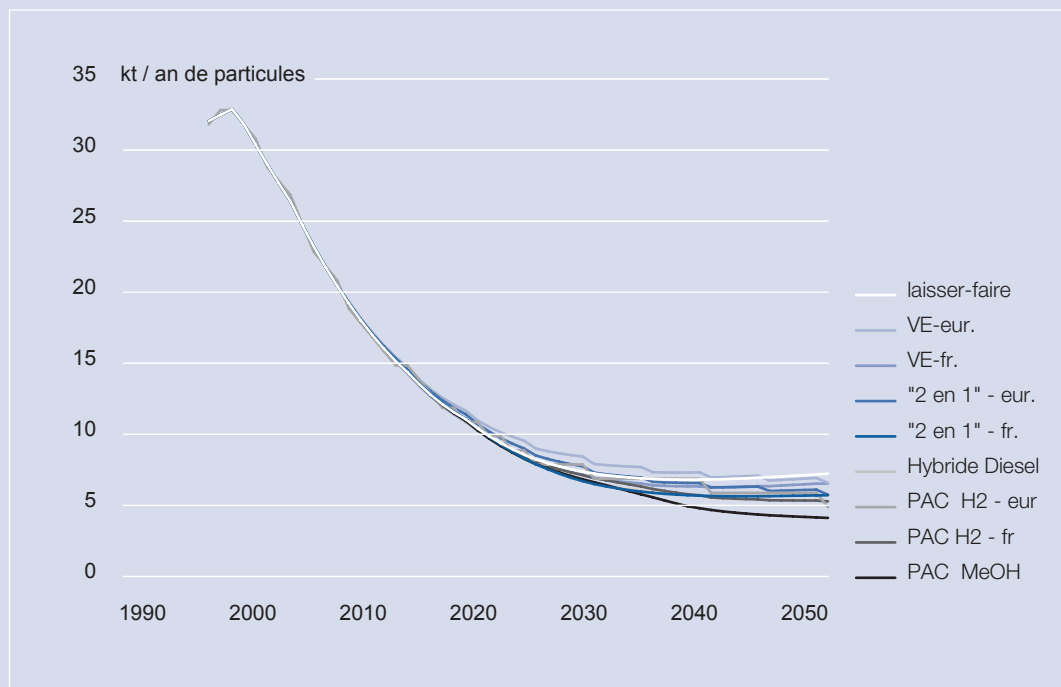
$e = 80 \%$ efficacité de la batterie au Lithium-Ion dans le cas idéal d'utilisation.

$K = 1,07$, facteur de détérioration de la batterie

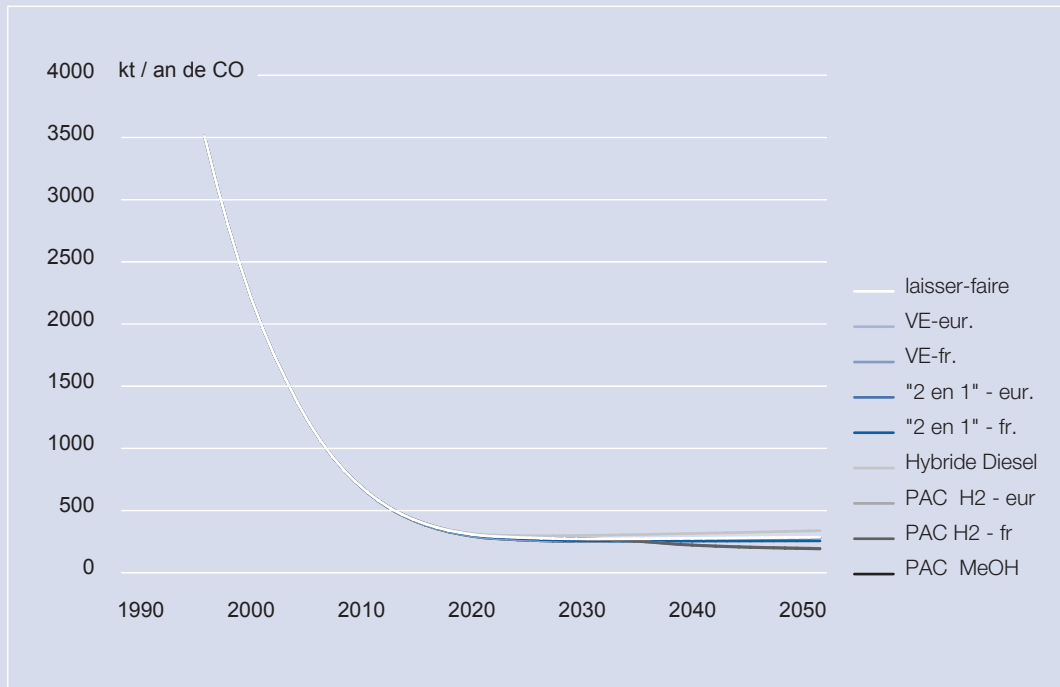
$V =$ vitesse exprimée en km/h

Annexe 3 Résultats

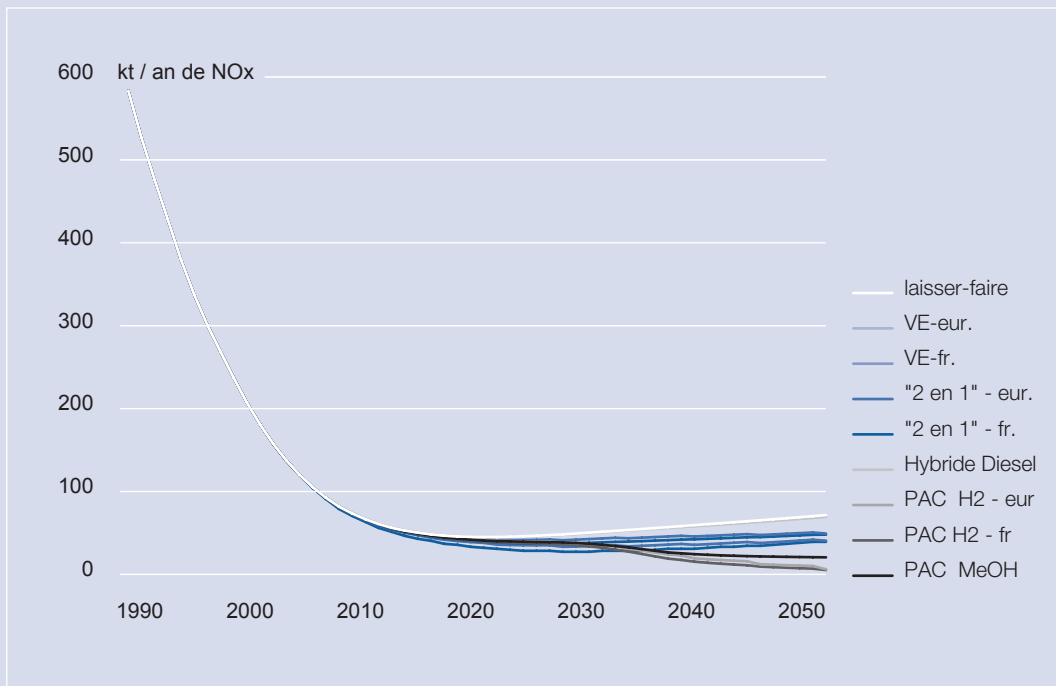
Emissions de particules



Emissions de CO



Emissions de NOx



Notes

- ¹ “Automobile et développement durable – Bilan environnement – Matières premières 1975 – 2050”, Les cahiers du CLIP n°9, 1998. Intitulé de la troisième partie : “Analyse prospective de l’évolution du bilan énergie, environnement et matières premières du parc automobile en France (1975 –2050).
- ² “Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l’automobile” - Caroline GALLEZ - Université de Paris I – Panthéon – Sorbonne – oct.1994
- ³ “Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport – emission Factors for Future Road Vehicles” – Aristotle University Thessaloniki – LAT Rapport n° 9829, Sept. 1998.
- ⁴ “Driving statistics for the assessment of pollutant emissions from road transport, INRETS Report LTE 9906, Michel ANDRE, Feb. 1999
- ⁵ Données de Renault
- ⁶ 10 % en 2010, 50% en 2015 et 100% en 2020.
- ⁷ Rapport INSEE.
- ⁸ ADEME-INRETS, panel "Parc Auto" SOFRES-1994-95-96-98
- ⁹ “Actualité des Hydrocarbures”, Manfred HAFNER, Pétrole et Technique, n°417
- ¹⁰ “ENERGY IN EUROPE – European Energy to 2020”, Directorate General for Energy, European Commission, 1996
- ¹¹ “Énergie 2010-2020, les chemins d’une croissance sobre”, rapport du Groupe Plénier, Commissariat Général au Plan, sept. 1998.
- ¹² Chiffres extraits de l’offre d’électricité (production nette) du scénario S2 “industrie” en 2020.
- ¹³ “Refinery Upgrading Through IGCC Process and Environment Highlights”, Vincenzo Russo, ERG Petroli, SpA – The European Oil Refining Conference & Exhibition

Bibliographie

- ▶ Allemand Nadine, "Estimation de l'Evolution des Emissions de Polluants du Trafic Routier en France de 1990 à 2020", CITEPA, 23 Juillet 1998.
- ▶ André Michel, Ulf Hammarström, Isabelle Reynaud, "Driving Statistics for the Assessment of Pollutant Emissions from Road Transport", INRETS, rapport LTE 9906, Fév. 1999
- ▶ Armengol C., Bensaid B., "Emissions de Gaz à Effet de Serre Associées aux Véhicules Electriques et Thermiques sur toute la chaîne Energétique", IFP, rapport interne 41086, janv. 1994
- ▶ Arquès Phippe, "La Pollution de l'Air : Causes, Conséquences, Solutions", 1998
- ▶ Atkin Graham and Storey Jonathan, "Electric Vehicles : Prospects for Battery-, Fuel Cell- and Hybrid-Powered Vehicles", 1998
- ▶ Boisson Pierre, "Energie 2010-2020 : Les Chemins d'une Croissance sobre", Commissariat Général au Plan, sept. 1998.
- ▶ Bourdeau Béatrice, "Evolution du Parc Automobile Français entre 1970 et 2020", INRETS, rapport LEN n°9801, Janv. 1998
- ▶ Center for transportation Research Argonne National Laboratory, "Electric and Hybrid Electric Vehicles : A Technology Assessment Based on a Two-Stage Delphi Study", dec. 1997
- ▶ Couderc Jacques, "Traitement du fichier des Véhicules Particuliers de 1998 – Evolution des consommations et des Caractéristiques Techniques des VON Pondérées par les Immatriculations", ADEME / DTT, 11 Oct. 1999
- ▶ Degobert Paul, "Automobile et Pollution", nov. 1992
- ▶ Dessus Benjamin, "Energie 2010-2020 : Rapport final de l'atelier Les défis du long terme", Commissariat Général au Plan, oct. 1997
- ▶ European Commission, "Energy in Europe : European Energy to 2020 – a Scenario Approach", special issue, printemps 1996
- ▶ European Commission, "Energy in Europe : European Union Energy Outlook to 2020", special issue, nov. 1999
- ▶ Frina Giovanni Lorenzo, "Utilization of Residues with Cogeneration", The 1999 European Oil Refining Conference & Exhibition
- ▶ Gallez Caroline, "Modèles de Projection à Long Terme de la structure du Parc et du Marché de l'Automobile", Thèse de Doctorat, Oct. 1994
- ▶ Green Sian, "Combined Cycle Power Plants", PEI, Sept. 1999
- ▶ Hafner Manfred, "Gaz Naturel et Production d'Électricité : Analyse technologique et économique de la Génération d'électricité et du transport de gaz pour les pays du bassin méditerranéen", thèse de Doctorat, Juillet 1994
- ▶ Hafner Manfred, "Une petite révolution dans la production d'électricité : les turbines à gaz, les cycles combinés et la cogénération", Pétrole et Techniques, n°417.
- ▶ Henry K. Ng, Anant D. Vyas and Danilo J. Santini, "The Prospects for Hybrid Vehicles, 2005-2020 : Results of a Delphi Study", Argonne National Laboratory, Août 1999
- ▶ IFEN, "l'Environnement en France", 1999
- ▶ IFP, "Rapport Final sur la Réglementation des Emissions des Véhicules routier : Etats-Unis, Europe et Japon", PRIMEQUAL-PREDIT 97, rapport interne 453030, mars 1999
- ▶ Lavy J., Dabadie J.C., Dammeme F., "New Hybrid Concepts Simulation Tool Development and Evaluation on the Toyota Prius Car", EQUIP AUTO 99, 15 Oct. 1999
- ▶ Lewis C.A., "Fuel and Energy Production Emission Factors", R112, 20 Juin 1997
- ▶ Modern Power Systems, "Combined Cycle Technology" and "Advanced Gaz Turbines", Sept. 1999
- ▶ Nedderman John, "First 701 Gs prepare for commercial operation", Modern Power Systems, janv. 1999
- ▶ Russo Vincenzo, "Refinery Through IGCC Process and Environmental Highlights", The 1999 European Oil Refining Conference & Exhibition
- ▶ Samaras Zissis and Andrias Apostolos, "Road Traffic Emission Forecasts for France (period calculation 1990 to 2010)", Aristotle University Thessaloniki, oct.1996
- ▶ Samaras Zissis, Coffey Robert, Kyriakis Nicolas, "Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport : Emission Factors for Future Road Vehicles", Aristotle University Thessaloniki, Déc. 1998
- ▶ Union Routière de France, "Faits et chiffres 1995 : Statistiques du Transport en France", Oct. 1996

Glossaire

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
CC	Cycle combiné
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO	Monoxyde de carbone
FP	Filtre à particules
H ₂	Hydrogène liquéfié
HC	Hydrocarbures
IGCC	"Integrated Gasification Combined Cycle"
MVEG	"Motor Vehicle Emissions Group"
MeOH	Méthanol
NOx	Oxydes d'azote
PAC	Pile à combustible
SO ₂	Dioxyde de soufre
TAV	Turbine à vapeur
TAG	Turbine à gaz
VE	Véhicule électrique
VH	Véhicule hybride
VP	Véhicule particulier

Anciens numéros

N°1 - Octobre 1993 - 104 pages - puis

- ▶ Le moteur à explosion : exercice de prospective mondiale des transports routiers
- ▶ L'autocondamnation : un exercice de prospective mondiale à long terme pour l'automobile
- ▶ Capture et stockage du gaz carbonique produit par les activités industrielles

N°2 - Mai 1994 - 64 pages - puis

- ▶ Les enjeux environnementaux de la pénétration du véhicule électrique en Europe
- ▶ Etude comparative des émissions de polluants associées à l'utilisation de carburants de substitution
- ▶ Emissions de gaz à effet de serre : de la production d'hydrogène à son utilisation en tant que carburant automobile

N°3 - Octobre 1994 - 80 pages - puis

- ▶ Le bois-énergie en France : évaluation prospective du potentiel mobilisable à l'horizon 2015 et ses conséquences sur l'environnement

N°4 - Juin 1995 - 58 pages - puis

- ▶ Etude de faisabilité d'une centrale solaire en Tunisie
- ▶ Impact environnemental d'une désulfuration poussée des gazoles

N°5 - Juillet 1996 - 98 pages - puis

- ▶ Déchets-Energie-Environnement : étude prospective du potentiel de déchets mobilisables à des fins énergétiques en France à l'horizon 2020

N°6 - Septembre 1996 - 80 pages - format électronique (pdf)

- ▶ Le bois-électricité : Perspectives de développement de la production d'électricité à base de bois en France à l'horizon 2015
- ▶ Pollution des sols : Contamination des sols par les rejets d'hydrocarbures : analyse du marché de la réhabilitation

N°7 - Janvier 1997 - 80 pages - format électronique (pdf)

- ▶ MDE-L'éclairage en France : diffusion des technologies efficaces de maîtrise de la demande d'électricité dans le secteur de l'éclairage en France

N°8 - Janvier 1998 - 112 pages - anglais/français - disponible

- ▶ Le bois-énergie en Europe : évaluation du potentiel mobilisable à l'horizon 2020, impacts sur l'environnement global et conditions socioéconomiques de sa mobilisation.

N°9 - Décembre 1998 - disponible

- ▶ Automobile et développement durable : bilan environnement-matières premières 1975-2050
- ▶ Automobile et gaz naturel : scénarios prospectifs et impact sur l'environnement

N°10 - Septembre 1999 - format électronique (pdf)

- ▶ Biomasse et électricité
- ▶ Géothermie des roches fracturées

N°11 - Décembre 1999 - disponible

- ▶ Le froid domestique

N°12 - Mars 2001 - disponible

- ▶ Parc automobile et effet de serre : Agir sur le parc automobile pour réduire l'effet de serre

Pour toute demande ou renseignement, veuillez contacter :

Carine Barbier - CNRS-Ecodev, 1 rue du Cerf, 92195 Meudon - France

Téléphone : (33) 1 45 07 59 34 - Fax : (33) 1 45 07 59 44 - E-mail : carine.barbier@cnrs-dir.fr