



GAUCHE UNITAIRE EUROPÉENNE
GAUCHE VERTE NORDIQUE
GROUPE PARLEMENTAIRE EUROPÉEN

GUE/NGL

La contribution de la voiture électrique à la préservation du climat

Souhaits et réalités

Axel Friedrich, Rudolf Petersen

Étude réalisée à la demande du groupe Gauche unitaire européenne
Gauche verte nordique du Parlement européen

novembre 2009

Table des matières

1. Impératifs de la réduction des émissions de gaz à effet de serre

1.1 Le changement climatique est une réalité

1.2 Dangers d'une réduction insuffisante des émissions de gaz à effet de serre

1.3 Pistes à développer en matière de consommation d'énergie et protection du climat

2. Aspects techniques de la propulsion électrique appliquée aux véhicules routiers

2.1 Le schéma actuel: carburant liquide et moteur à combustion

2.2 Possibilités de substitution à la propulsion par essence ou diesel

2.3 Caractéristiques particulières du schéma batterie - moteur électrique

2.4 Conditions générales de circulation des voitures électriques

3. La contribution de la voiture électrique à la préservation du climat

3.1 Situation actuelle et perspectives à court et moyen termes

3.2 Coûts de la voiture électrique et répercussions pour la préservation du climat

4. Motivations des parties intéressées

4.1 Le monde politique

4.2 L'industrie automobile

4.3 Le secteur électrique

5. L'argument écologique: les voitures électriques pour la production d'électricité renouvelable

5.1 Premier argument (répété): les voitures électriques, véhicules à émissions zéro

5.2 La comparaison exacte: propulsion électrique contre moteur à explosion et moteur diesel, sur le plan énergétique et climatique

5.3 Perspectives pour la production électrique du futur

5.4 Le second argument écologique: les voitures électriques, outils de lissage du réseau

6. Résumé

1. Impératifs de la réduction des émissions de gaz à effet de serre

1.1 *Le changement climatique est une réalité*

Les médias livrent quasi quotidiennement leur lot d'informations sur des catastrophes naturelles: les inondations aux Philippines, au Vietnam ou au Bangladesh, ou les épisodes de sécheresse persistante en Inde ou en Chine ne sont que les exemples les plus frappants de ces fléaux. Les symptômes du changement climatique sont visibles dans bon nombre de régions du globe. Les scientifiques s'accordent aujourd'hui à reconnaître que ces mutations sont provoquées par l'homme, les émissions croissantes de gaz à effet de serre jouant le premier rôle à cet égard. Les modélisations les plus récentes supputent que si ces rejets continuent à augmenter, la hausse de la température du globe par rapport au niveau préindustriel atteindra jusqu'à 4 degrés à l'horizon 2060, voire 10 degrés dans le cas de l'Arctique.

Dans son quatrième rapport d'évaluation élaboré par son deuxième groupe de travail, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de l'Organisation des Nations unies est parvenu à dégager d'importantes conclusions, qui reprennent essentiellement des études menées depuis 1970. Des observations effectuées sur tous les continents et la plupart des océans révèlent que le changement climatique à l'œuvre dans ces zones affecte de nombreux écosystèmes, en particulier sous l'effet de l'élévation des températures. Eu égard aux modifications concernant la couverture neigeuse et glaciaire ainsi que les sols gelés (dont le pergélisol), il est hautement vraisemblable que les systèmes naturels sont touchés par le processus.

On peut en citer quelques illustrations:

- l'accroissement, en superficie et en nombre, des lacs glaciaires,
- l'instabilité croissante des sols dans les régions de pergélisol, ainsi que l'augmentation de la fréquence des éboulements rocheux dans les zones montagneuses,

- les modifications qui se sont produites dans certains écosystèmes arctiques et antarctiques.

En s'appuyant sur une base de données factuelles de plus en plus étoffée, on peut affirmer avec un haut degré de fiabilité que les systèmes hydrologiques sont soumis aux modifications suivantes, qui sont attestées dans le monde entier:

- augmentation des débits et avancement de la date où ils atteignent leur valeur maximale de printemps pour de nombreux cours d'eau à alimentation glaciaire et nivale,
- réchauffement des lacs et fleuves de nombreuses régions, avec les effets qui en résultent pour leur structure thermique et leur qualité hydrologique.

Grâce au recours à une base de données élargie à un plus grand nombre d'espèces, il est permis d'avancer avec un haut degré de fiabilité que dans un passé récent, le réchauffement a exercé des répercussions massives sur les systèmes biologiques terrestres, induisant diverses mutations, par exemple:

- une apparition plus précoce des signes annonciateurs du printemps, qu'il s'agisse du débourrement des arbres, du retour des oiseaux migrateurs ou de la ponte des espèces aviaires,
- une extension de l'aire de répartition des espèces végétales et animales en direction des pôles et, en montagne, des altitudes plus élevées.

Si l'on se fonde sur les observations satellitaires effectuées depuis le début des années 1980, on peut conclure avec un haut degré de fiabilité à un allongement, imputable au réchauffement, de la période végétative sous l'effet d'un réveil plus précoce de la végétation au printemps.

Sur la foi de nouvelles bases factuelles, il est des plus assurés que les bouleversements observés dans les systèmes biologiques en milieu marin et en eau douce soient liés à l'élévation des températures hydriques ainsi qu'à des modifications concernant la couverture glaciaire ou la salinité, l'acidité et la circulation des eaux. Comme exemples de ces modifications, on peut mentionner:

- des glissements dans l'aire de répartition des algues, du plancton et des

poissons et des changements dans l'état de leurs stocks, aux latitudes proches des pôles,

- des mouvements affectant les aires de peuplement des poissons et un avancement de leur calendrier migratoire dans les rivières.

La combustion de sources d'énergie fossiles, telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, produit non seulement du dioxyde de carbone, qui s'accumule dans l'atmosphère, mais dégage aussi d'autres substances qui ont une incidence sur le climat, comme le protoxyde d'azote, le méthane, des suies ou des substances qui jouent le rôle de précurseurs pour la formation de l'ozone, ainsi que les hydrocarbures et les oxydes d'azote. On notera cependant que d'autres émissions, comme celles de protoxyde d'azote et de méthane d'origine agricole, jouent elles aussi un rôle important dans le changement climatique.

Le dernier rapport d'évaluation du GIEC, publié en 2007, expose les fondements scientifiques en matière de mutations du climat et présente une estimation des effets à attendre des différents scénarios d'action qui peuvent être arrêtés pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Un large consensus s'est dégagé parmi les scientifiques quant à la nécessité de limiter à un maximum de 2°C l'élévation mondiale de la température par rapport au niveau d'avant la révolution industrielle: à défaut d'y parvenir, la Terre s'expose à des bouleversements dramatiques, bien plus graves que ceux qui ont déjà pu être constatés.

Selon les calculs des modèles climatiques, ce plafonnement à 2°C nécessite que d'ici 2050, les émissions de gaz à effet de serre soient réduites d'au moins 50 %, c'est-à-dire, si l'on raisonne en termes individuels, que les rejets de CO₂ soient limités à un maximum de 2 tonnes par personne et par an. Pour comparaison, on indiquera qu'un citoyen allemand en émet actuellement quelque 10 tonnes par an et un Américain, plus de 20 tonnes. Si l'on considère par ailleurs que les pays en développement ont le droit de poursuivre leur progression économique, on en conclura que les nations développées doivent parvenir à une réduction drastique de leurs émissions de gaz à effet de serre.

Pour l'Allemagne, cet impératif suppose de les faire baisser d'au moins 80 % par rapport à 1990. Encore ces projections ne valent-elles que si l'on entreprend de les

réduire dès à présent: plus tard ces efforts de diminution seront entamés, plus la baisse devra être forte, car les gaz à effet de serre qui ont déjà été émis persistent très longtemps dans l'atmosphère. On peut dire à cet égard que les gaz à effet de serre s'accumulent comme dans une espèce de banque; autrement dit, l'on ne peut se contenter, d'ici 2050, de continuer sur la lancée actuelle jusqu'en 2045 et de n'utiliser que les cinq dernières années de cette période pour diminuer les rejets.

1.2 Dangers d'une réduction insuffisante des émissions de gaz à effet de serre

Nous ne disposons pas encore de connaissances suffisantes sur la manière dont le climat réagit à cette élévation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre: en particulier, nous ne pouvons pas encore prédire les bouleversements brutaux et rapides qui pourraient se produire. À titre d'exemple emblématique de telles évolutions, on peut citer la modification du Gulf Stream. En l'état actuel des choses, les changements provoqués par des processus non linéaires résistent à la modélisation. Ces "points de basculement"¹ ont pour caractéristique de survenir d'une manière soudaine et, surtout, irréversible à l'échelle du temps humain.

Le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) vient de tirer la sonnette d'alarme:

Dans le chapitre de son *Climate Change Science Compendium 2009* ("Recueil scientifique 2009 sur le changement climatique") consacré aux glaces sur notre planète, l'organisation attire l'attention sur le recul brutal et accéléré que subissent les glaciers dans des massifs comme les Alpes et l'Himalaya, le déclin rapide des glaces arctiques, l'instabilité de la banquise et l'augmentation de la vitesse de fonte des grands inlandsis de notre Terre (Groenland, Antarctique occidental et oriental). Il est tout particulièrement préoccupant que ce processus se déroule à un rythme nettement plus rapide que ne l'avaient calculé les modèles climatiques.

Ces évolutions spectaculaires ont de profondes répercussions. Dans de nombreuses régions du globe, les fleuves émissaires des glaciers constituent la principale ressource qui pourvoit aux besoins hydriques pour la consommation humaine,

¹ En anglais, on parle de "tipping points".

l'agriculture, la production d'électricité ou la batellerie. Plus d'une centaine de millions de personnes se trouvent ainsi menacées dans leurs conditions mêmes d'existence.

Dans nos régions aussi, la régression des glaciers alpins aura une incidence marquée sur l'économie. Désormais et quand bien même nous lancerions rapidement des programmes draconiens pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, nous ne sommes plus en mesure d'arrêter le changement climatique mais pouvons tout juste le ralentir, parce que les émissions déjà libérées dans l'atmosphère y ont une période de rémanence très longue. Il faudra plus d'un millénaire pour que le CO₂ rejeté jusqu'à présent se dissolve totalement. Aussi est-il nécessaire de compléter les dispositifs de diminution des rejets par des mesures d'adaptation. Dans l'étude qu'elle vient de consacrer à ce sujet, la Banque mondiale estime que pour s'adapter au changement climatique, les pays les plus pauvres du globe devront, durant la période de 2010 à 2050, consentir des dépenses annuelles de 75 à 100 milliards de dollars, rien que pour se préserver des effets les plus néfastes du réchauffement de la Terre. Pour fixer les idées par une comparaison, on signalera que cette somme équivaut grosso modo à l'enveloppe mondiale allouée actuellement à l'aide au développement². Ces engagements sont indispensables si l'on veut prendre des mesures pour atténuer les effets du changement climatique, comme les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations ou d'autres phénomènes météorologiques extrêmes.

1.3 Pistes à développer en matière de consommation d'énergie et protection du climat

Les tendances mondiales

Chaque année, l'Agence internationale de l'énergie publie ses "Perspectives énergétiques mondiales" ("World Energy Outlook"), qui brossent un tableau de l'évolution de la consommation énergétique des différents secteurs suivant les scénarios de développement prévisibles pour les vingt années à venir. Comme le montre la figure 1, il est escompté qu'à l'échelle mondiale, ces besoins en énergie continueront à être en forte croissance, c'est-à-dire que le cours qu'ils ont suivi ces

²

"The Economics of Adaptation to Climate Change (EACC)" ("Aspects économiques de l'adaptation au changement climatique"), 2009, <http://beta.worldbank.org/climatechange/content/economics-adaptation-climate-change-study-homepage>.

dernières années se poursuivra et ira s'accroissant, tant et si bien qu'en 2030, le volume d'énergie consommé dépassera de 45 % le niveau actuel.

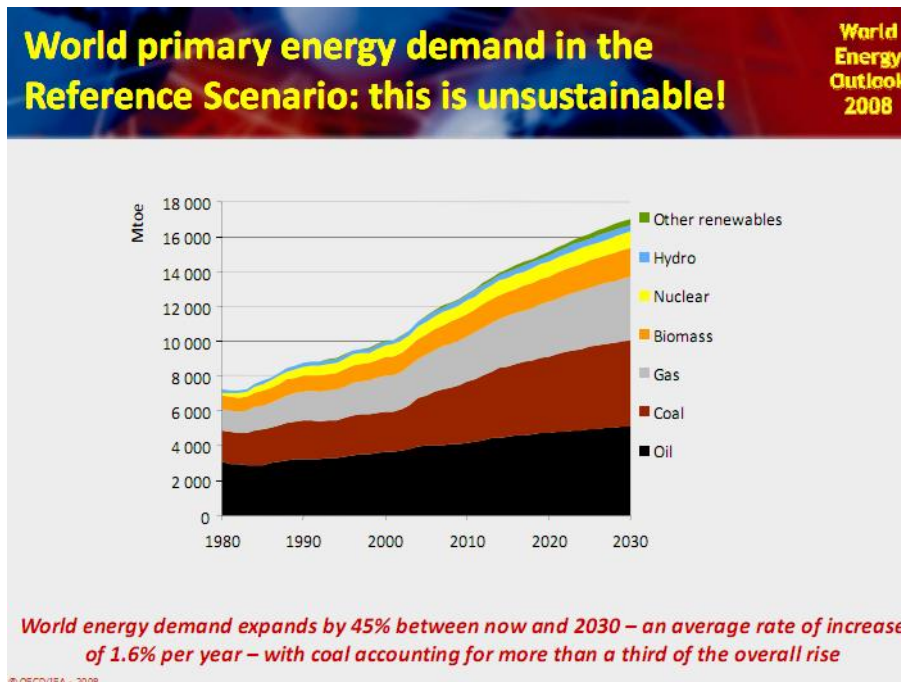


Fig. 1 - Consommation mondiale d'énergie primaire (scénario de référence)

Demande mondiale d'énergie primaire dans le scénario de référence: une situation intenable!

Perspectives énergétiques mondiales 2008

Millions de tonnes d'équivalent pétrole

Autres énergies renouvelables

Hydroélectricité

Nucléaire

Biomasse

Gaz

Charbon

Pétrole

La demande énergétique mondiale augmentera de 45 % d'ici à 2030, au rythme d'accroissement annuel moyen de 1,6 %, le charbon assurant plus du tiers du volume global de cette augmentation.

Dans son rapport, l'AIE fait le constat qu'une telle évolution n'est pas tenable et qu'elle contrevient aux impératifs de la lutte contre le changement climatique,
Fiche SOC 10393/2009 DE-JL/SL/DB/gl
DV\798845FR.doc

.../...

puisqu'elle aboutit à accroître fortement les émissions de CO₂, alors qu'il serait nécessaire, tout au contraire, de les réduire.

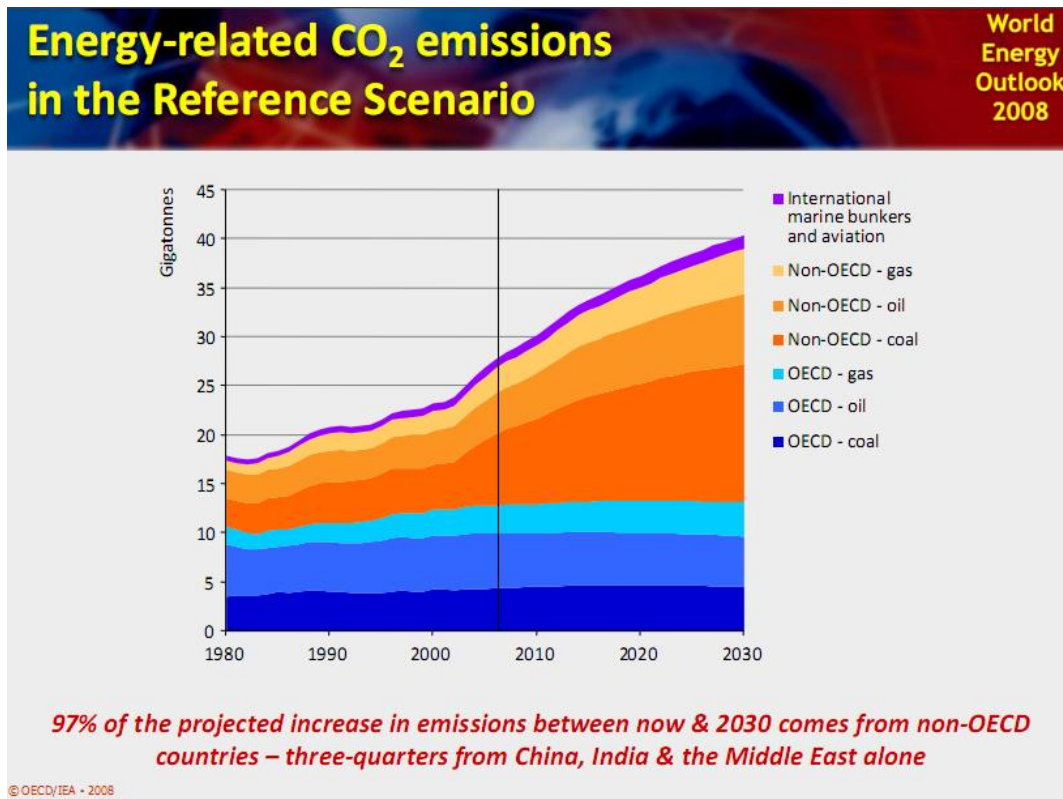


Fig. 2 - Émissions de dioxyde de carbone liées à l'énergie dans le scénario de référence

Émissions de CO₂ en rapport avec l'énergie dans le scénario de référence
Perspectives énergétiques mondiales 2008
Gigatonnes
Transport maritime international par soute et aviation
Pays hors OCDE – gaz
Pays hors OCDE – pétrole
Pays hors OCDE – charbon
Pays OCDE – gaz
Pays OCDE – pétrole
Pays OCDE - charbon
L'augmentation des émissions qui est prévue d'ici à 2030 provient à 97 % de pays non membres de l'OCDE, la Chine, l'Inde et les pays du Moyen-Orient intervenant pour les trois quarts de ce chiffre.

La consommation de pétrole brut poursuit elle aussi sa croissance, essentiellement parce que la planète continue à se motoriser. En conséquence, c'est en Chine, au Moyen-Orient et en Inde que cette hausse est la plus importante, en chiffres absolus.

En revanche, il est escompté que les volumes de pétrole consommés en Europe occidentale et aux États-Unis connaîtront une diminution, dont l'ampleur sera cependant si modeste qu'elle ne pourra aucunement compenser, loin s'en faudra, leur augmentation dans les autres parties du monde.

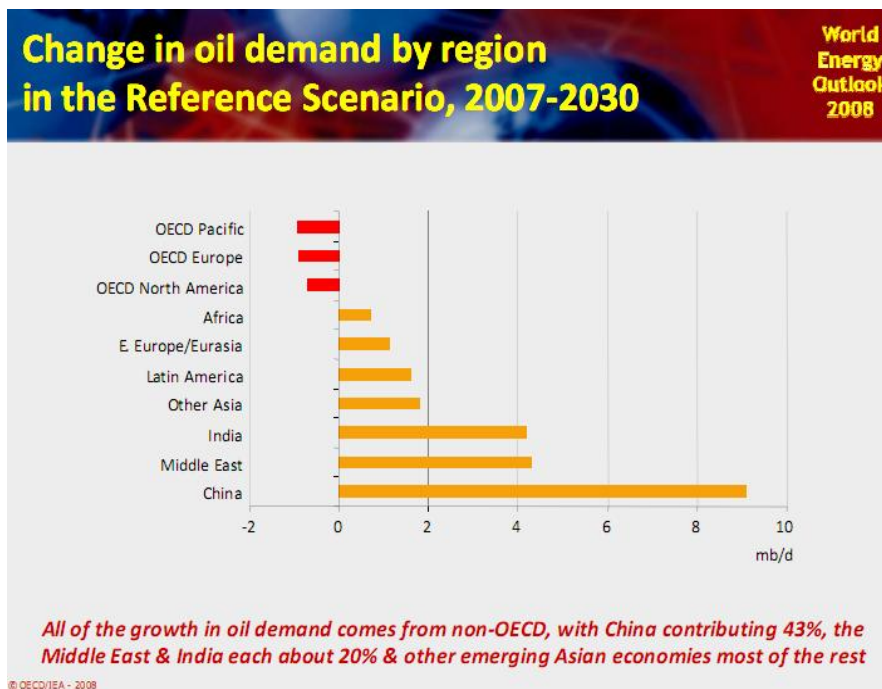


Fig. 3 - Évolution par régions de la demande de pétrole brut dans le scénario de référence sur la période 2007-2030

Évolution de la demande pétrolière par région dans le scénario de référence (2007-2030)

Perspectives énergétiques mondiales 2008

OCDE Pacifique

OCDE Europe

OCDE Amérique du Nord

Afrique

Europe de l'Est / Eurasie

Amérique latine

Autres pays d'Asie

Inde

Moyen-Orient

Chine

millions de barils par jour

L'augmentation de la demande de pétrole provient intégralement de pays hors OCDE; la Chine y contribue pour 43 %, le Moyen-Orient et l'Inde pour environ 20 % chacun et les autres économies asiatiques émergentes pour le solde.

Le transport est responsable de la majeure partie de l'augmentation de la demande; les autres secteurs ne jouent pas de rôle important à cet égard.

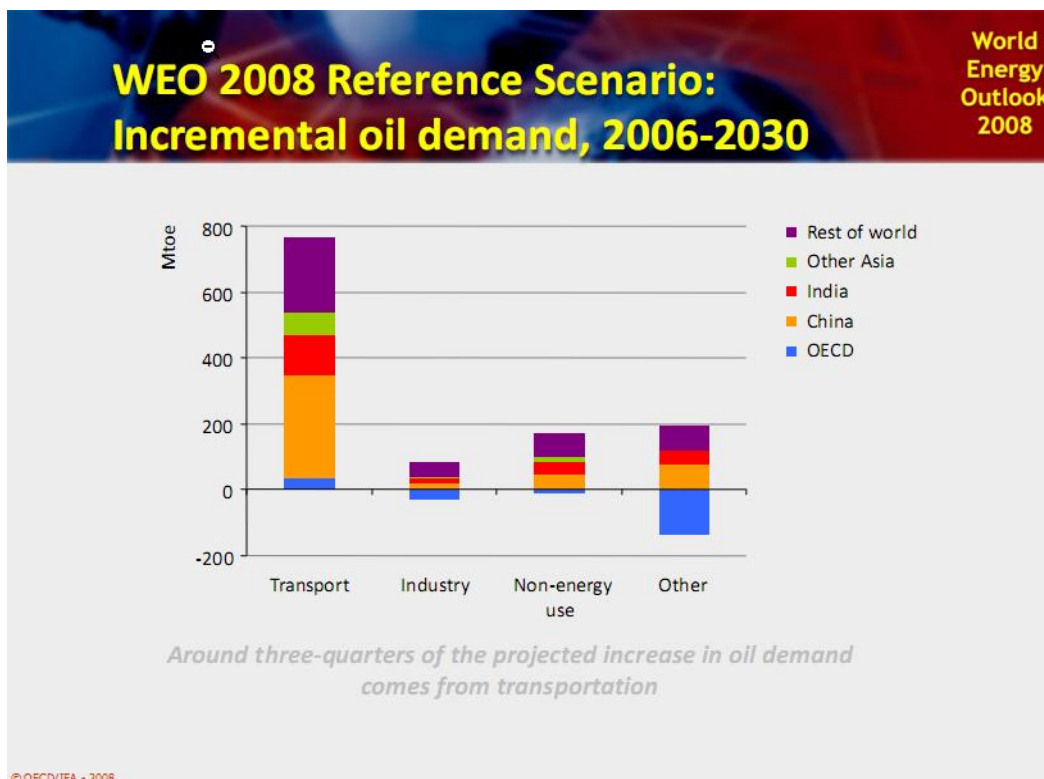


Fig. 4 - Besoins supplémentaires en pétrole brut pour la période 2006-2030

Scénario de référence des Perspectives énergétiques mondiales 2008: besoins supplémentaires en pétrole pour la période 2006-2030

Perspectives énergétiques mondiales 2008

Millions de tonnes d'équivalent pétrole

Reste du monde

Autres pays d'Asie

Inde

Chine

OCDE

Transport industrie utilisations non énergétiques autres

Pour environ les trois quarts, l'augmentation prévue de la demande de pétrole provient du transport.

La question qui se pose est bien évidemment de savoir d'où proviendront ces volumes croissants de pétrole brut qui seront ainsi nécessaires. Dans beaucoup de régions pétrolifères, l'extraction pétrolière a déjà dépassé son plafond maximal. De nouveaux gisements sont certes encore découverts de temps à autre mais leur taille, par rapport aux quantités totales actuellement extraites, apparaît réduite et négligeable. Des nouvelles technologies, plus sophistiquées, permettent d'augmenter le taux de récupération des réserves existantes mais elles ne font que reporter le problème de quelques années.

Dans un contexte de prix plus élevés, il deviendra toujours plus rentable de prospecter et d'exploiter des configurations géologiques plus difficiles; ainsi, les grands fonds marins devraient encore apporter certaines découvertes. Il n'en reste pas moins que le pétrole se renchérit notablement et que nous resterons confrontés au problème du caractère fini de cette ressource.

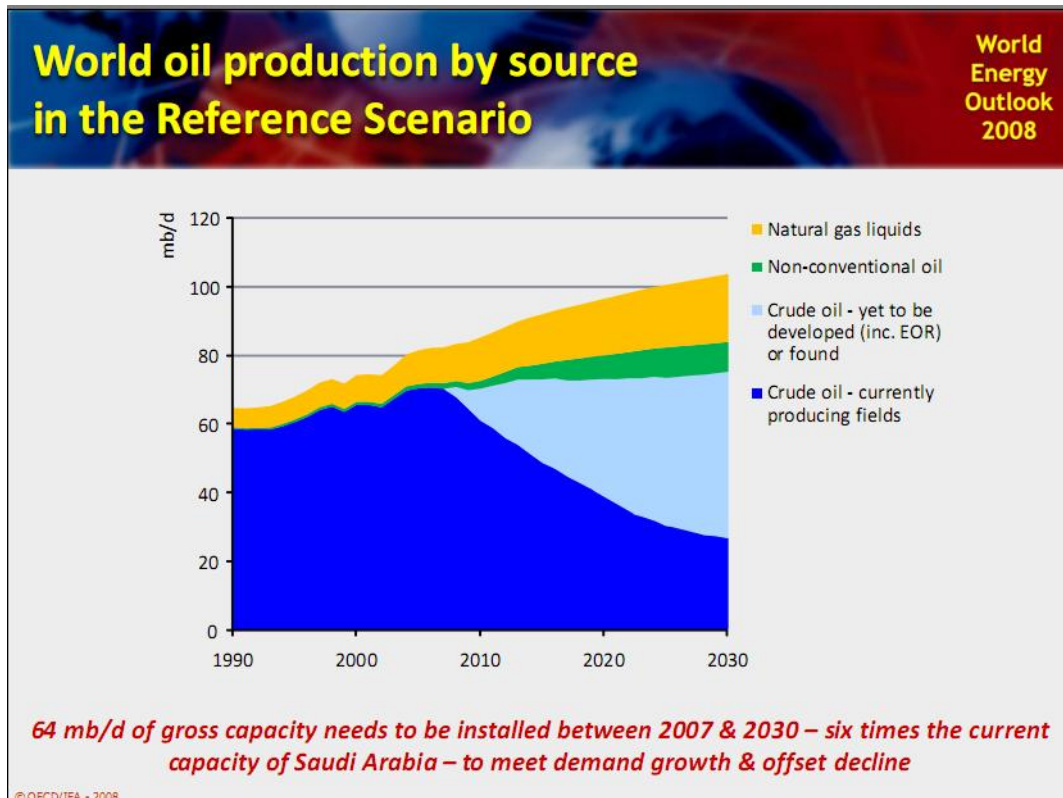


Fig. 5 - Projections de l'AIE concernant la production pétrolière dans le futur (gaz liquide compris)

Répartition par sources de la production pétrolière mondiale dans le scénario de référence

Perspectives énergétiques mondiales 2008

Millions de barils par jour

Condensats de gaz naturel

Pétrole non conventionnel

Pétrole brut – encore à développer (y compris par amélioration du taux de récupération) ou à découvrir

Pétrole brut – champs actuellement en production

Pour répondre à la croissance de la demande et compenser le déclin des champs exploités, il faudra mettre en production des gisements pour 64 millions de barils par jour entre 2007 et 2030, soit six fois la capacité actuelle de l'Arabie saoudite.

Depuis quelques années, les réserves de pétrole dit "non conventionnel", comme les pétroles lourds mais aussi celui que l'on peut extraire des sables ou des schistes

bitumineux, sont devenus intéressants d'un point de vue économique³. Produits de la transformation du gaz naturel en diesel ou essence par le procédé de synthèse Fischer-Tropsch, les carburants synthétiques devraient eux aussi apporter une contribution appréciable aux approvisionnements futurs.

Ces "espérances pétrolières" se heurtent à deux interrogations essentielles, qui demandent réflexion:

1. Dans le cas des nouvelles découvertes, nous avons essentiellement affaire à des ressources supputées, dont le volume n'a pas été calculé avec précision mais simplement estimé. Il n'est pas certain que les gisements escomptés pourront être réellement découverts et exploités.
2. L'exploitation des réserves de pétrole non conventionnel ira de pair avec un accroissement des émissions de CO₂ et d'autres pollutions environnementales.

En ce qui concerne ce dernier point, on fera observer que du fait du recours à l'eau chaude et à la haute pression, le traitement des sables bitumineux et schistes pétrolifères du Canada pose de sérieux problèmes environnementaux dans les régions concernées et que l'opération présente un piètre bilan énergétique qui aboutit à une augmentation sensible des émissions à gaz à effet de serre, tant spécifiques qu'absolues. On estime que si le pays exploitait ces réserves à grande échelle, son bilan climatique se détériorerait de 25 %, de sorte que cette hypothèse est écartée.

L'évolution européenne

En Europe aussi, les différentes sources d'énergie interviennent pour des pourcentages analogues dans la consommation énergétique et les émissions de CO₂. Selon les données de l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), cette part s'élève à quelque 36 % pour le pétrole, sans qu'il faille tabler sur des changements notables à l'horizon 2030.

3

Ayant requalifié en 2007 ses sables et schistes bitumineux en "ressources pétrolières", le Canada s'est retrouvé d'un seul coup, avec 174 milliards de barils de réserves, à la deuxième place des pays producteurs de pétrole, après l'Arabie saoudite, dans le classement de l'Agence internationale de l'énergie (voir AIE 2007 et 2008).

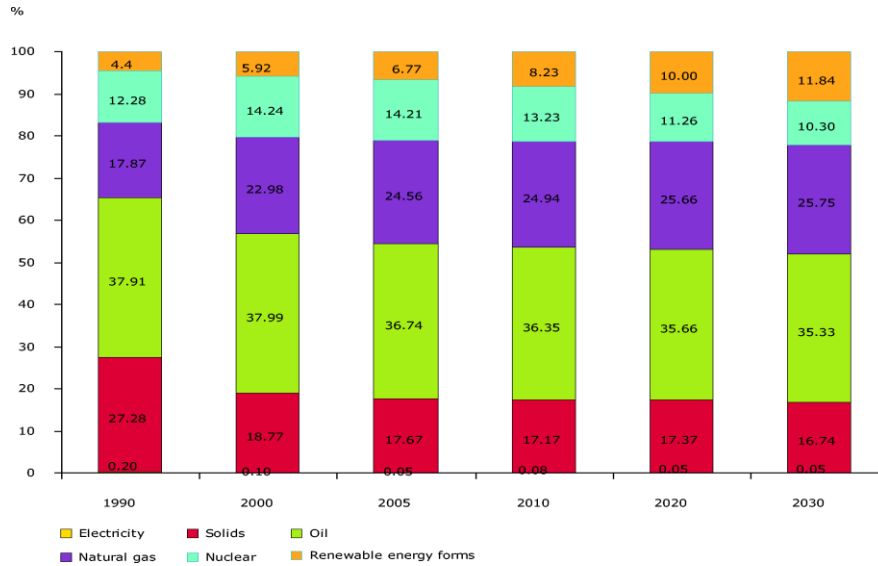


Fig. 6 - Structure de la consommation énergétique dans les 27 États membres de l'UE de 1990 à 2005 et prévisions de son évolution jusqu'en 2030 (source: AEE 2009)

Électricité	Combustibles solides	Pétrole
Gaz naturel	Nucléaire	Sources d'énergie renouvelables

On peut voir que par rapport à d'autres secteurs, les émissions imputables au transport ont augmenté en Europe davantage que la moyenne.

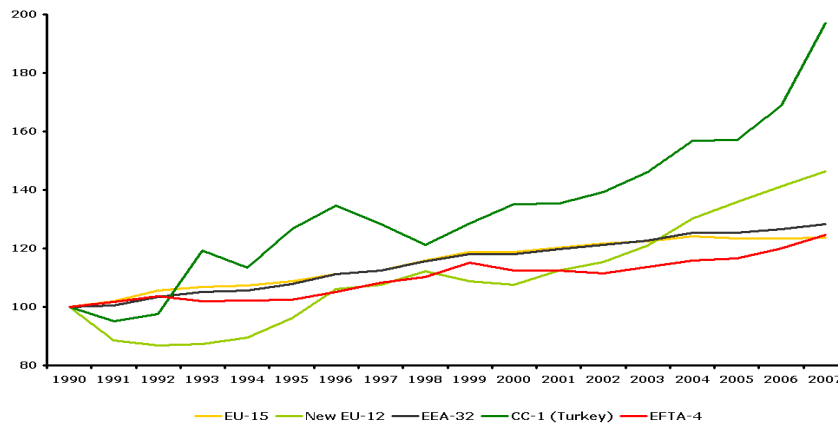


Fig. 7 - Émissions totales de gaz à effet de serre dues au transport dans l'UE (source: AEE 2009)

- UE à quinze États membres
- Douze nouveaux États membres
- Trente-deux pays de l'Agence européenne pour l'environnement
- Un pays candidat (Turquie)
- Quatre pays de l'Association européenne de libre-échange

Le graphique ci-après (fig. 8) montre que les États membres de l'UE ont suivi des trajectoires très différentes dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre qui résultent du transport: sur la période 1990-2006, ils ne sont que quatre à avoir atteint l'objectif de les faire baisser. Pour trois d'entre eux, cette diminution doit être rapportée aux bouleversements qu'a connus leur économie après l'effondrement du bloc soviétique, tant et si bien que l'Allemagne reste le seul pays de l'Union qui puisse se prévaloir de les avoir fait régresser grâce à une politique ad hoc, encore qu'il ne faille pas perdre de vue que son bilan en la matière a pu être flatté par le "tourisme de la station-service" que pratiquent certains de ses automobilistes dans certains pays voisins, où les carburants sont moins lourdement taxés. En effet, la méthode de calcul du protocole de Kyoto prend en considération les volumes qui, dans un pays, ont été débités à la pompe, et non ceux qui y ont été consommés.

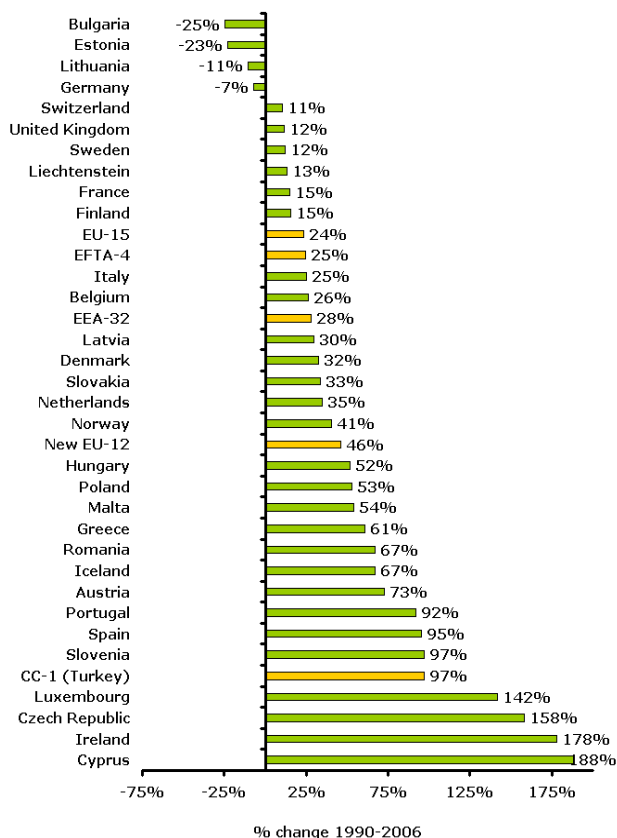


Fig. 8 - Évolution des émissions de CO₂ liées au transport dans les États membres de l'UE (source: AEE 2009)

Bulgarie
Estonie
Lituanie
Allemagne
Suisse
Royaume-Uni
Suède
Liechtenstein
France
Finlande
UE à quinze États membres
Quatre pays de l'Association européenne de libre-échange
Italie
Belgique
Trente-deux pays de l'Agence européenne pour l'environnement

Lettonie
Danemark
Slovaquie
Pays-Bas
Norvège
Douze nouveaux États membres de l'UE
Hongrie
Pologne
Malte
Grèce
Roumanie
Islande
Autriche
Portugal
Espagne
Slovénie
Un pays candidat (Turquie)
Luxembourg
République tchèque
Irlande
Chypre
Évolution en % sur la période 1990-2006

Pour l'avenir, il est permis d'escompter qu'avec sa population vieillissante, l'Europe arrivera, dans les pays du Sud et du centre, à juguler les augmentations de consommation. S'ajoutant à la modification que le vieillissement induit dans les modèles de mobilité, avec la disparition des déplacements professionnels ou commerciaux, la fixation de plafonds d'émissions de CO₂ constituera un facteur déterminant pour parvenir à une telle réduction dans des conditions financièrement avantageuses. À partir de 2015, ces rejets seront limités à 130 g/km pour les véhicules particuliers et la directive européenne en la matière prévoit de les faire descendre à 95 g/km en 2020. Des limitations analogues sont en voie d'établissement pour les véhicules utilitaires. La Commission européenne envisage de plafonner de même les émissions des poids lourds. D'autres mesures ont

cependant également leur importance dans ce domaine, qu'il s'agisse de réaménager les transports publics locaux, d'améliorer les conditions dans lesquelles le transport non motorisé peut se pratiquer ou de modifier l'encadrement fiscal général.

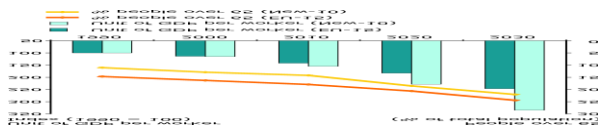


Fig. 9 – Part des personnes de plus de 65 ans dans la population totale et ressources nécessaires pour la formation du revenu par personne exerçant une activité professionnelle

(Source: European Environment Outlook, [Perspectives européennes en matière d'environnement], AEE 2005)

Unité de PIB par travailleur (UE à quinze États membres)
Unité de PIB par travailleur (dix nouveaux États membres)
Pourcentage des plus de 65 ans dans la population (UE à quinze États membres)
Pourcentage des plus de 65 ans dans la population (dix nouveaux États membres)
Unité de PIB par travailleur (personnes de plus de 65 ans)
Indice (1990 = 100) (% de la population totale)

Tous ces développements sont cependant absolument insuffisants si l'on veut parvenir à atteindre les diminutions d'émissions nécessaires pour parer à la catastrophe climatique. En tant que nations développés, les États européens, tout

comme les États-Unis et le Japon, se doivent de faire baisser radicalement leurs émissions de gaz à effet de serre en rapport avec le transport et d'élaborer des solutions qui soient également acceptables pour les pays en voie de développement.

Par le passé, les propositions avancées par l'industrie automobile étaient axées autour d'une substitution des sources d'énergie utilisées, dans la mesure où une telle option n'obligeait pas à remodeler de fond en comble notre système de transport.

Après les expérimentations, fondées sur le méthanol et l'éthanol, que les pouvoirs publics ont soutenues dans les années 1980 et 1990, et le premier essai à grande échelle d'utilisation de la voiture électrique, on a entrepris, dans un deuxième temps, d'encourager le recours aux biocarburants ou encore à l'hydrogène, dans des piles à combustibles. Lorsqu'il devint clair qu'un long laps de temps s'écoulerait encore avant que la technologie requise pour le fonctionnement de ce dispositif ne soit commercialement disponible et que, par ailleurs, les chercheurs n'étaient pas parvenus à déterminer comment il serait possible de fabriquer de l'hydrogène et de le stocker à bon compte, les attentes se déplacèrent sur la filière des biocarburants, nonobstant les mises en garde que l'Office fédéral allemand de l'environnement avait formulées dès 1993 quant à leurs répercussions environnementales.

Une fois que le débat sur les effets d'un recours accru aux biocarburants eut gagné les enceintes politiques et le grand public, dans un contexte notamment marqué par l'augmentation des prix alimentaires, l'option de la voiture électrique revint sur le devant de la scène.

2. Aspects techniques de la propulsion électrique appliquée aux véhicules routiers

2.1 *Le schéma actuel: carburant liquide et moteur à combustion*

Il y a une centaine d'années que le moteur à combustion a réussi sa percée commerciale pour assurer la propulsion des véhicules routiers, évinçant en quelques années le moteur électrique et la machine à vapeur qui étaient ses concurrents et, dans les décennies d'avant 1910, possédaient encore une part de marché appréciable.

Le facteur déterminant pour le succès du moteur à combustion fondé sur le cycle d'Otto, qui fonctionnait alors exclusivement à l'essence, résidait dans la puissance spécifique du carburant, qui permettait tout à la fois de parcourir de longues distances et d'obtenir du moteur un rendement élevé. Il n'était pas possible de construire de moteurs à vapeur d'un encombrement aussi réduit et leur démarrage était également plus compliqué. Quant à la propulsion électrique, son point faible ne se situait pas au niveau du moteur mais de son réservoir d'énergie.

Ce problème persiste jusqu'à aujourd'hui: alors qu'une voiture propulsée par un moteur à combustion peut parcourir plus de 700 km avec, par exemple, un réservoir d'une contenance de 50 l et dont le poids, y compris le matériau dont il est fabriqué, n'atteint pas 50 kg, une auto électrique a besoin de batteries de plusieurs centaines de kilos pour pouvoir couvrir une distance de plus de 100 km.

Pour donner une illustration concrète de ce propos, on prendra le cas d'une petite cylindrée qui roule à une vitesse constante de 100 km/h, exigeant de son moteur une puissance de 25 kW (35 ch)⁴. La consommation caractéristique d'un moteur diesel moderne se monte à quelque 250 g de carburant par kWh⁵. Sept heures seront nécessaires pour effectuer le trajet Hambourg-Munich, à 100 km/h, pour une consommation de 35 à 40 kg de carburant diesel.

Un kilogramme de carburant permet de produire un effort moteur de 4 kWh, alors qu'une batterie moderne lithium-ion, n'atteint que 200 Wh par kg de masse, soit 0,2 kWh, soit une intensité énergétique vingt fois moindre⁶. De ces chiffres, il ressort immédiatement qu'une voiture à propulsée à l'électricité fournie par des batteries ne se prête pas aux mêmes usages qui représentent la norme pour les autos actuelles. On oublie souvent qu'en l'espèce, nous n'avons pas affaire à une motorisation d'un nouveau type mais à un concept global de véhicule, qui obéit à une logique propre. Pour leur énergie, moteur à combustion et moteur électrique recourent à des sources

4 On se base ici sur un modèle de véhicule dont le poids est de 1000 kg, avec des coefficients normaux de résistance au roulement et à l'air.

5 Cette valeur couvre un large segment de la courbe de fonctionnement et, dans l'exemple mentionné, inclut les pertes de rendement imputables à la transmission. Les meilleures performances de consommation pour les moteurs diesel à injection montés sur véhicules particuliers se situent aux alentours de 200 g/kWh, soit un rendement de 41 %.

6 Si la valeur de 4 kWh/kg pour le moteur diesel coïncide au travail mécanique utile, il faut encore déduire, dans le cas d'un moteur électrique combiné à des batteries, les pertes qui sont fonction du taux de rendement du premier et du degré de déchargement des secondes: cumulées, elles atteignent au moins 15 %.

et réservoirs totalement différents; en outre, les étapes énergétiques en amont, du gisement primaire au produit utilisable par le véhicule, revêtent une grande importance. La voiture électrique présente des caractéristiques d'une telle originalité que son adoption ne manquerait pas d'avoir des conséquences pour les habitudes quotidiennes des automobilistes.

2.2 Possibilités de substitution à la propulsion par essence ou diesel

L'exposé succinct de la question climatique auquel il a été procédé dans le chapitre 1 de la présente étude a expliqué qu'il est nécessaire de réduire aussi, de manière substantielle, les émissions de CO₂ provoquées par le trafic routier. Depuis que l'Allemagne et l'Europe ont promu l'atténuation du changement climatique au rang de priorité politique, c'est-à-dire depuis 1987 environ, diverses approches techniques ont été présentées à l'opinion publique pour faire face à ces problèmes. On rappellera en premier les espoirs qui ont été placés dans un biocarburant, l'ester méthylique de colza (EMC), puis dans le gaz naturel, tous deux accompagnés de forts incitants fiscaux.

À partir de 1995 environ, ce fut le couple pile à combustibles et hydrogène qui suscita un engouement généralisé, dont la défunte société Daimler-Chrysler se fit le principal relais auprès des gouvernements. Une production de véhicules en série devait démarrer en 2005; aujourd'hui, les spécialistes raillent la "fuel cell" ("pile à combustible") en la rebaptisant "fool cell" ("cellule de fou"), les grandes annonces n'ayant jamais reçu de concrétisation. En dépit des mises en garde que l'Office fédéral allemand de l'environnement avait lancées dans ce domaine comme dans d'autres, il s'avéra que l'on s'était totalement fourvoyé au moment d'évaluer les coûts et les difficultés techniques qui sont inhérents à cette propulsion comme à la fourniture de l'hydrogène censé servir de carburant (ou du méthanol, qui était une autre piste évoquée pour propulser ces véhicules dotés de piles à combustible).

Durant quelques années, à dater de 2002, ce furent les carburants fabriqués à partir de ressources renouvelables qui tinrent la vedette, pour apporter une solution aux problèmes climatiques comme à ceux de l'approvisionnement énergétique. Les biocarburants acquirent cependant une très mauvaise réputation, dès lors qu'on se

pencha sur la question de la concurrence qu'ils induisaient avec la production vivrière du point de vue de l'affectation des sols mais aussi lorsqu'il apparut clairement que pour satisfaire la demande des riches États motorisés, il faudrait inévitablement recourir à des importations en provenance de pays en voie de développement: pour peu que l'on prenne en considération la destruction des forêts tropicales qui se déroule dans ces États, il n'est plus tenable de prétendre préserver durablement le climat grâce aux biocarburants, lesquels produisent au contraire l'effet opposé.

Depuis 2005, le monde politique, dans une quasi-unanimité, et l'industrie automobile ou, en tout cas, ses fédérations sectorielles et départements de relations publiques, considèrent que l'avenir appartient à la voiture à batteries. Les tenants de cette vision du futur forment une coalition bien plus large encore que celles réunies autour des idées précédentes; ses rangs se sont étoffés avec l'arrivée du géant industriel que constitue le secteur de l'électricité. Le concept de mobilité étant investi d'une charge extrêmement positive, la société ne trouve guère de réserves à formuler à l'encontre de l'auto propulsée sur batteries, qui, parée de l'aura de l'électromobilité, fera son "plein" d'électricité sur le réseau.

Il a échappé au grand public que trains et tramways incarnent depuis belle lurette ladite "mobilité électrique", tout comme il n'a pas saisi que les voitures à batteries constituent en fait une très vieille technologie dans le domaine de l'automobile et qu'elles font intervenir des infrastructures conventionnelles pour la fourniture de leur énergie. La présente étude va maintenant examiner quels sont les caractéristiques techniques et les environnements qui plaideraient pour que la propulsion des voitures soit assurée par de l'électricité stockée dans des batteries.

2.3 Caractéristiques particulières du schéma batterie - moteur électrique

Substituer le moteur électrique à la propulsion par moteur à explosion ou moteur diesel offre une série d'avantages techniques mais aussi écologiques.

Les moteurs électriques⁷ peuvent fonctionner dans des plages de charge et à des nombres de tours nettement plus élevés sans nécessiter embrayage ni boîte de vitesses.

- Quand aucun effort de propulsion n'est nécessaire, le moteur est purement et simplement à l'arrêt et ne consomme aucune énergie.
- Il fournit dès lors sa puissance initiale de manière souple et très douce.
- Il ne donne lieu à aucune production *directe* d'émissions polluantes locales: c'est sur le site de la centrale électrique que ces rejets sont produits.
- La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique assure une puissance élevée sur une très large étendue de la courbe nombre de tours/charge.

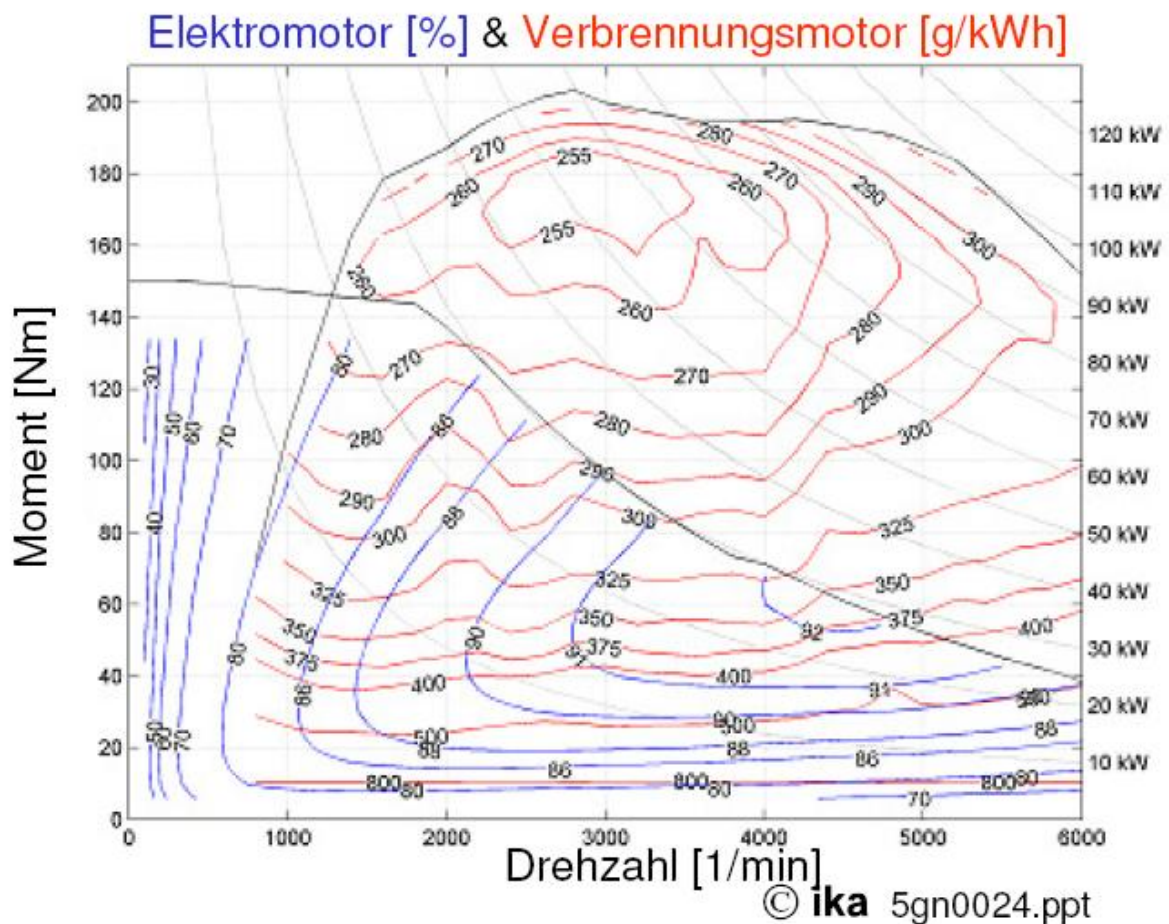


Fig. 10 - Courbes de rendement d'un moteur à combustion et d'un moteur électrique (source: Wallentowitz ika RMTH Aix-la-Chapelle 2008)

⁷ Il n'est pas nécessaire d'entrer ici dans le détail de leurs différentes variantes technologiques (moteurs synchrones, asynchrones, etc.).

Moteur électrique (bleu, en %) et moteur à combustion (rouge, en g/kWh)

Moment (Nm)

Nombre de tours (/min.)

Par rapport aux moteurs à combustion⁸, les moteurs électriques présentent donc des avantages appréciables; telle est la raison pour laquelle le moteur à combustion n'est pas utilisé pour produire les mouvements mécaniques nécessaires dans des configurations stationnaires, de la perceuse industrielle à l'aspirateur. En tout état de cause, il est nécessaire de disposer d'une prise de courant: le point peut paraître trivial mais constitue en fait le nœud du problème lorsqu'il est question de moteur électrique. Pour les usages mobiles (locomotives électriques, tramways, trolleybus), on recourt depuis plus d'un siècle à des pantographes qui captent le courant par frottement sur un câble électrique nu.

Lorsqu'il n'est pas possible de leur fournir une alimentation électrique continue, les moteurs électriques sont tributaires d'accumulateurs de courant et l'on recourt alors soit à des piles (à utilisation unique, non rechargeables), soit à des accumulateurs (réutilisables, après recharge)⁹. Dans les voitures électriques et applications similaires (de l'ordinateur portable au tournevis à accumulateur), ce sont des accumulateurs que l'on utilise, même si le langage courant emploie constamment le terme "batteries" ou "piles" pour les désigner. Tout un chacun a déjà pu constater, dans les moments les plus inopportuns, que même les "batteries" modernes ont une capacité limitée, qui est fonction du temps et de la puissance prélevée; on comprendra dès lors qu'il en va de même pour l'usage du moteur électrique.

Nous nous proposons de revenir dans un chapitre ultérieur sur les développements à l'œuvre en matière d'accumulation électrique, dans des dispositifs que pour faire simple, nous appellerons "batteries" (c'est-à-dire "accumulateurs montés en

⁸ Il existe de nombreux types de moteurs à combustion; les seuls à être employés pour la propulsion des voitures et camions sont le moteur à explosion et le moteur diesel, qui se rangent dans la catégorie des moteurs à piston alternatif et cycle de combustion interne. Parmi ceux qui ressortissent à d'autres catégories par la structure ou le fonctionnement, on peut notamment citer les moteurs Wankel, où le piston est rotatif et non alternatif, les turbines à gaz, dans lesquelles la combustion interne est continue, les moteurs Stirling, à combustion externe continue, etc. Toutes ces autres formes n'ont pas réussi à s'imposer pour la motorisation d'automobiles.

⁹ Voir les normes VDE, séries 509 et 510, ainsi que les normes DIN correspondantes.

batterie"). Bornons-nous pour l'instant à constater que si l'on en croit les publications spécialisées, c'est la technologie lithium-ion (Li-Ion) qui, après avoir délogé les batteries nickel-hydrure (NiMH)¹⁰ de cette première place, détient aujourd'hui les meilleures chances d'être le réservoir d'énergie qui sera choisi pour propulser les voitures électriques.

Quel que soit le type de batterie envisagé, il s'avère que la température ambiante n'est pas sans influence sur l'énergie motrice disponible. Cette caractéristique peut poser des problèmes l'hiver, d'autant que le niveau de confort atteint par les voitures actuelles implique bien évidemment qu'elles soient dotées d'un chauffage. Un véhicule moderne est doté de toute une série d'agréments qui sont actionnés à l'électricité (lève-vitre, dégivreur, etc.) mais dont la consommation énergétique n'a pas d'incidence pour un moteur à combustion pourvu d'un générateur ("génératrice") de bonne puissance¹¹. En l'absence de moteur à combustion, par exemple dans le cas d'une voiture "100 %" électrique, il sera nécessaire d'optimiser avec le plus grand soin ces fonctionnalités supplémentaires, voire d'y renoncer, pour ne pas mettre en péril les performances de déplacement (accélération, vitesse et autonomie).

L'un des avantages de la voiture propulsée par un moteur électrique est qu'elle permet de récupérer l'énergie de freinage, en utilisant le dispositif comme un générateur, l'électricité ainsi produite étant alors envoyée dans la batterie qui assure l'énergie de déplacement, où elle est disponible pour la propulsion du véhicule et accroît d'autant ses réserves énergétiques. La fraction de son énergie de freinage qui se prête à une telle récupération est fonction de plusieurs paramètres techniques qui le caractérisent, ainsi que de ses conditions de circulation.

¹⁰ Ces batteries NiMH sont d'ailleurs disponibles en version non rechargeables (piles) ou rechargeables (accumulateurs).

¹¹ Bien qu'ils augmentent le volume de carburant consommé, ces éléments de confort sont exclus des calculs dans les essais de consommation et d'émissions prescrits par la législation

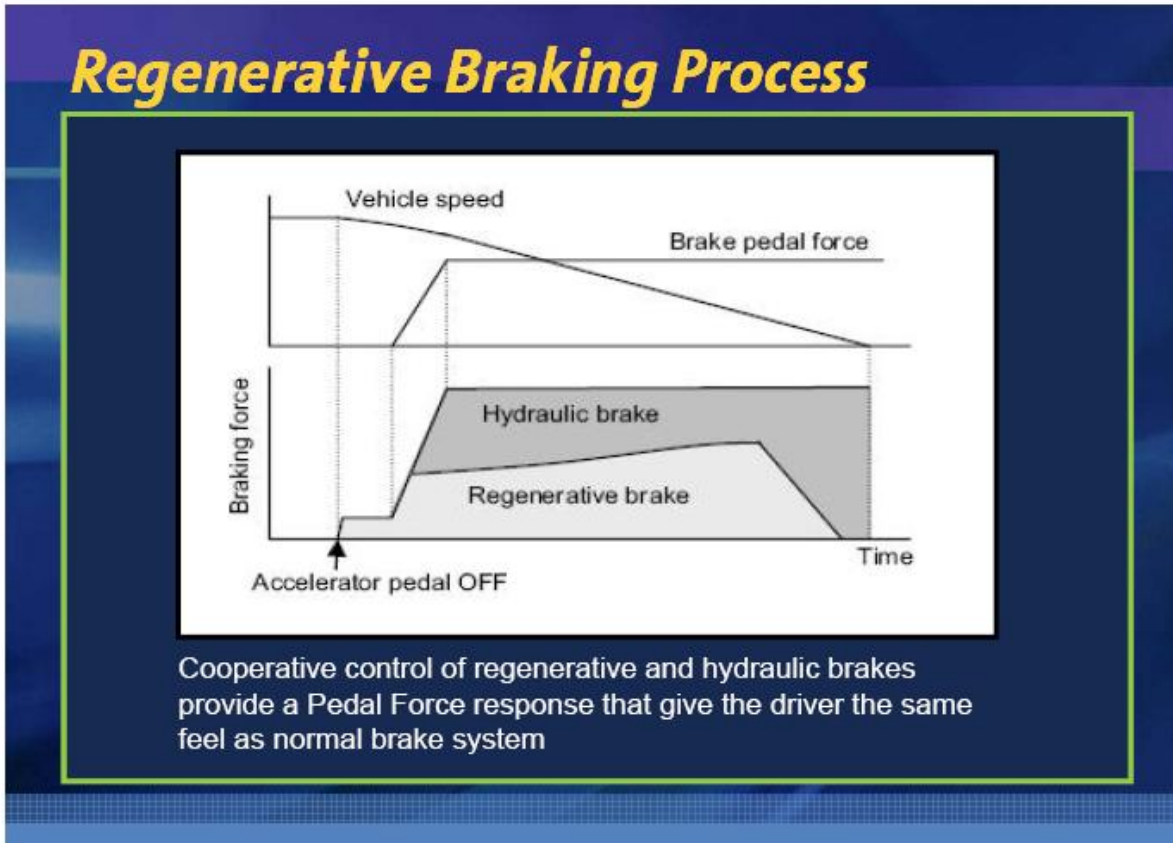


Fig. 11 – Récupération d'une fraction de l'énergie de freinage (source: Walraven GM 2008)

Processus de freinage dynamique

Vitesse du véhicule

Force exercée sur la pédale de frein

Force de freinage

Frein hydraulique

Frein dynamique

Pédale d'accélérateur en position de repos

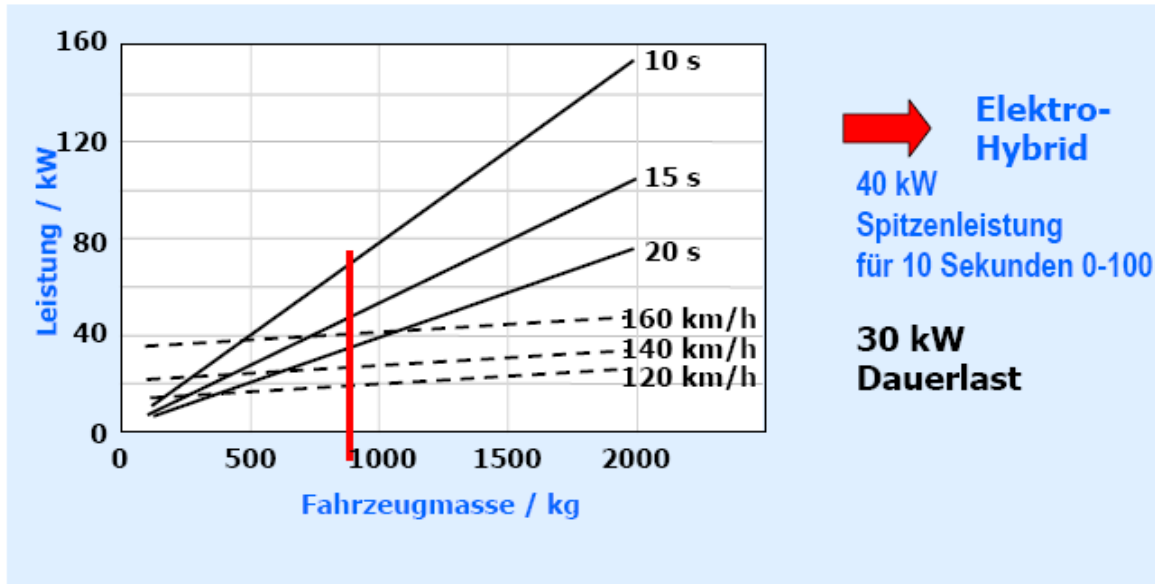
Temps

Le contrôle conjoint du frein dynamique et du frein hydraulique fournit à la force exercée sur la pédale une réponse qui donne au conducteur la même sensation qu'un système classique de freinage.

Pour s'en tenir aux grandes lignes, on peut dire que parce qu'il fait la part belle à circulation intra-urbaine au détriment de la dynamique de déplacement, autrement dit, parce qu'il ne présente que de faibles valeurs d'accélération et de décélération, le nouveau cycle de conduite européen (NCCE) offre des conditions propices à la récupération d'énergie du freinage, si l'on considère qu'en actionnant en douceur un frein classique, on n'est pas obligé de "gaspiller" une fraction aussi importante de la puissance dégagée par l'opération que si l'on appuie vigoureusement sur la pédale. Plus le générateur absorbe d'énergie de freinage, plus il est possible, théoriquement parlant, d'en restituer à la batterie du véhicule. Deux facteurs empêchent que cette énergie soit totalement récupérée. D'une part, il n'est pas possible, d'un point de vue technique, de convertir en courant l'énergie que la masse du véhicule dégage sur un court laps de temps lorsqu'elle décélère sous l'effet d'un mouvement de frein vigoureux, sous peine de créer des pics de charge trop élevés pour pouvoir être absorbés; ces pointes de freinage doivent dès lors être converties, par frottement, en chaleur qui se dissipe dans l'environnement. D'autre part, il est inévitable que des pertes d'énergie affectent, à tous les maillons de la chaîne, le circuit énergétique qui va du générateur à la batterie en passant par le chargeur et, en sens inverse, de la batterie au moteur qui propulse le véhicule. On peut escompter que l'énergie de freinage électrique pourra être réaffectée à la propulsion de la voiture dans une proportion de 50 à 60 %, tandis que les 40 à 50 % restants continueront à être perdus.

Tous les véhicules actuellement en circulation ont des moteurs surdimensionnés pour rouler dans les conditions du nouveau cycle de conduite européen. Comme le montre le graphique ci-après, la puissance que doit fournir une voiture de milieu de gamme est de 40 kW pour de brefs intervalles de temps et nettement moins en vitesse de croisière.

Wieviel Leistung brauchen wir wann?



KKL, September 2008 / PD05

Fig. 12 – Besoins énergétiques d'une automobile pour rouler à vitesse constante et accélérer (source: Dietrich CCEM-PSI 2008)

Quelle est la puissance nécessaire?

Puissance, en kW

Masse du véhicule, en kg

Propulsion hybride

40 kW de puissance de pointe pour accélération de 0 à 100 km/h en 10 secondes

30 kW à charge constante

Selon une habitude prise au cours de ces dernières décennies, les véhicules du segment inférieur du milieu de gamme sont équipés de puissances de propulsion nettement plus élevées et présentent des temps d'accélération de 0 à 100 km/h inférieurs à 12 secondes. En outre, le poids des voitures de la catégorie des berlines compactes est rarement inférieur à 1200 kg. Ces deux contraintes amènent à des motorisations d'une puissance d'environ 90 kW et il n'est pas exceptionnel qu'il en

soit fait effectivement usage, sur autoroute, dans le cas des conducteurs dits "sportifs".

Les moteurs électriques sont capables de fournir des puissances élevées: pour de brefs laps de temps, ils peuvent eux aussi aller nettement au-delà de leur puissance nominale; de ce point de vue, ce type de propulsion ne pose donc pas de problèmes pour procurer des accélérations puissantes. La difficulté réside ici dans la faible capacité de stockage de la batterie: un calcul sommaire suffit à montrer que grosso modo, un tel véhicule de milieu de gamme ne mettrait pas plus de 15 minutes à épuiser l'énergie stockée dans une batterie lithium-ion de 300 kg. Toujours pour le même style de conduite, le rayon d'action du véhicule monterait à 25 minutes de mobilité si les freinages s'effectuaient avec la douceur requise pour que toute leur énergie soit récupérée avec un taux d'efficacité de 50 %. Il apparaît donc clairement que les autos à propulsion électrique sur batteries ne se prêtent pas à des vitesses de conduite élevées et fluctuantes.

2.4 Conditions générales de circulation des voitures électriques

Il existe pour toute technique des profils d'utilisation optimaux, de même que chaque concept a ses points forts et ses points faibles. Les voitures électriques ou, pour parler plus précisément, les automobiles qui fonctionnent sur le schéma "énergie stockée sur accumulateur et propulsion exclusivement électrique", ne sont pas à même de remplacer à grande échelle le moteur à combustion.

Parce que son réservoir d'énergie est d'une capacité limitée, une voiture électrique¹² – nous parlons ici d'un véhicule mû exclusivement par l'électricité, sans adjonction d'un moteur à combustion pour les trajets plus longs – est inapte à se substituer à une automobile classique. En conséquence, la voiture électrique dont la réserve énergétique est stockée sur batteries ne pourra avoir qu'un domaine d'utilisation réduit.

Les partisans de la voiture électrique sont tout à fait conscients de cet état de fait et ont dès lors été amenés à faire valoir que la majeure partie des parcours effectués

¹²

Les véhicules hybrides, dont le fonctionnement repose tout à la fois sur un moteur à combustion et un moteur électrique et qui stockent donc simultanément leur énergie dans un réservoir et des batteries, permettent de contourner l'obstacle du rayon d'autonomie mais le dédoublement des techniques utilisées a pour conséquence d'enrichir le véhicule et d'en alourdir le poids.

par des voitures particulières n'excèdent pas quelques kilomètres. Qu'ils visent à se rendre au travail, à aller faire les achats ou à d'autres utilisations privées du véhicule, la plupart de ces trajets sont tellement courts que la quantité d'énergie stockée dans sa batterie sera suffisante, si on les en croit, pour qu'il fonctionne totalement à l'électricité. À suivre ce raisonnement, la voiture électrique ne sera qu'un véhicule d'appoint, en sus de laquelle il sera nécessaire de disposer d'une "véritable" auto pour effectuer les autres parcours.

La question qui se pose dès lors est de savoir s'il est envisageable que, dans un horizon plus éloigné, une voiture à propulsion électrique puisse, dans sa conception globale, présenter les mêmes caractéristiques qu'une automobile conventionnelle. Cette interrogation porte au premier chef sur les paramètres qui ont une influence notable sur la consommation de carburant: masse du véhicule, vitesse maximale, performance à l'accélération et puissance du moteur. Si les voitures à propulsion électrique devaient, en toute hypothèse, rester cantonnées à la couverture de déplacements de faible ampleur, des vitesses maximales élevées ne présentent pas la même utilité que dans le cas où elles serviraient à se mouvoir sur de grandes distances. De même, si elles continuaient pour l'essentiel à n'être utilisées qu'en zones urbaines, les éléments de confort tels que les dimensions perdraient de leur importance.

S'agissant des perspectives de percée commerciale de la voiture électrique et, tout autant, des conséquences environnementales du soutien qui lui est accordé, les considérations que l'on vient de développer amènent à tirer des conclusions importantes. D'une part, l'expérience que l'on a pu tirer du succès mitigé remporté par la Smart sur les marchés montre que le souhait du consommateur n'est pas absolument d'avoir le véhicule taillé à la mesure exacte des usages qu'il doit en faire mais plutôt de disposer d'une voiture qui lui permettra de répondre aussi à ses desiderata moins fréquents en matière de mobilité. Un célibataire aura beau se débrouiller parfaitement avec un véhicule à deux places, pour ses déplacements de travail comme de loisirs, il n'en est pas moins évident qu'il désirera être à même d'embarquer davantage de passagers dans son véhicule et d'effectuer de plus longs parcours. Transposée à la voiture sur batterie, cette observation induit qu'il n'y aura guère d'acheteurs pour se laisser séduire par l'argument de la grande brièveté de la

plupart des trajets, tel qu'il est invoqué pour minimiser les inconvénients inhérents à la faible autonomie de ce type de véhicule. N'eussent-ils à accomplir que cinq fois par an des voyages plus longs que la moyenne, nécessitant une voiture propulsée par un moteur à combustion, ces cinq trajets pourraient suffire à faire pencher la balance en défaveur de la voiture sur batteries.

Lors du lancement de la Smart, la force de l'argumentation selon laquelle c'est seuls ou à deux tout au plus que les automobilistes effectuent la majeure partie de leurs déplacements avait déjà été nettement surévaluée. Les ventes de ce modèle n'ont jamais atteint les résultats escomptés et aujourd'hui encore, les statistiques de production restent insatisfaisantes, commercialement parlant. D'une manière générale, il a servi et sert encore de deuxième ou troisième auto, d'un prix relativement élevé. Par exemple, la Corsa s'écoule sur le marché à un nombre d'exemplaires plusieurs fois supérieur, parce qu'elle est d'un prix plus avantageux et qu'à l'occasion, elle permet aussi à une mère de véhiculer ses trois enfants. Bien que d'un point de vue statistique, le taux d'occupation moyen d'une voiture s'établisse à 1,3 passager, il apparaît qu'il est raisonnable, pour bon nombre de personnes, d'acheter un véhicule à quatre ou cinq sièges.

Quelque fréquents que soient les trajets courts – la fig. 13 montre qu'à proportion d'environ 90 %, les déplacements s'effectuent sur une longueur d'une trentaine de kilomètres et que la moitié de tous les kilomètres parcourus par les automobilistes le sont pour ces très brefs parcours -, l'achat d'un véhicule conçu pour de longs voyages peut être judicieux, individuellement parlant.

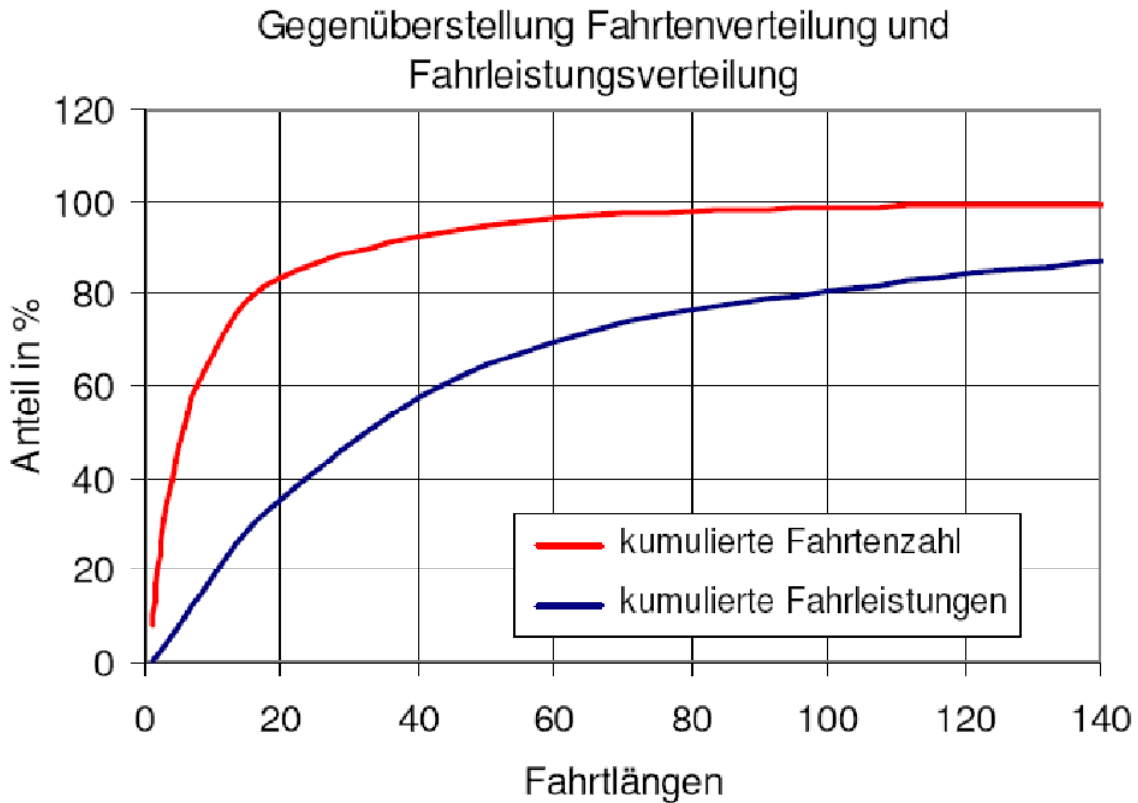


Fig. 13 - Répartition des trajets et des kilomètres parcourus par rapport à la moyenne quotidienne de la mobilité: l'exemple de l'Autriche (source: Leitinger TU Wien 2008)

Comparaison de la répartition des trajets et des kilométrages parcourus

Parts, en %

Nombre cumulé de trajets

Kilométrages cumulés

Longueurs des trajets

Dans une perspective environnementale, il y aurait lieu de calculer quelle est, dans la consommation énergétique globale imputable au segment des véhicules particuliers, la part pour laquelle les voitures sur batterie pourraient être une solution de substitution en ce qui concerne les trajets courts. Bien plus: permettent-elles seulement de réaliser des économies de CO₂ qui vailent d'être mentionnées? La thèse demande à être vérifiée, par des recherches approfondies dans deux directions, le premier de ces enjeux étant le nombre de kilomètres qui seraient couverts par des voitures électriques pourvues de batteries et rechargées sur le réseau, en lieu et place de celles équipées d'un moteur à combustion, et le second, les émissions qui sont spécifiquement produites par la production de l'électricité

nécessaire – et devront également comprendre le pourcentage correspondant de pertes qui se produisent dans la chaîne d'alimentation énergétique jusqu'à la propulsion.

Toutes les positions avancées jusqu'à présent sur le coût de la voiture électrique et, notamment, celui de ses batteries amènent à la conclusion qu'en l'absence de subventions publiques, ce mode de propulsion ne pourra devenir viable sur le marché. Ces aides, qui servent de base pour certains calculs des futurs coûts de déplacement par trajet, répondent à des mécanismes qui reposent essentiellement sur une exemption de la taxe sur les produits pétroliers. Actuellement, sur le plan politique comme sur celui des comptes nationaux, la fixation du montant de ces prélèvements est toujours envisagée en corrélation avec les dépenses encourues pour les infrastructures routières, même si, le plus souvent, il n'est pas encore tenu compte, dans cette opération, des coûts environnementaux.

Il va sans dire qu'il sera tout aussi nécessaire de construire et d'entretenir des routes pour la circulation des voitures à propulsion électrique. Eu égard à l'impératif d'équité face aux charges, il est indéfendable que l'acheminement, au départ du réseau électrique, de l'énergie de propulsion de ces véhicules ne soit pas frappé d'une taxation proportionnelle, sur le schéma de la taxe sur les produits pétroliers. Une des pistes à suivre pour répondre à ce problème pourrait consister à instaurer un péage généralisé pour les voitures.

Un autre aspect de la question, souvent négligé, est celui de la concurrence que la voiture électrique pourrait faire aux transports publics, puisque dans l'esprit de ses avocats, son domaine d'utilisation privilégié serait le trafic urbain.

3. La contribution de la voiture électrique à la protection du climat

3.1 Situation actuelle et perspectives à court et moyen termes

Que l'introduction de la voiture électrique produira des effets positifs pour l'environnement, en particulier en ce qui concerne la préservation du climat, est présenté comme une évidence dans bon nombre d'articles et de discours. Effectivement, les moteurs électriques, à la différence de ceux à combustion, n'émettent pas de polluants et les voitures qu'ils propulsent sont donc souvent qualifiées de véhicules à "zéro émission".

Il serait toutefois plus honnête de les appeler "voitures à émissions déplacées"; en outre, dans ce débat, on oublie généralement de voir qu'en ce qui concerne les polluants classiques - monoxyde de carbone, hydrocarbures et oxydes d'azote, les rejets des voitures à essence modernes qui respectent la norme d'émission Euro 4 atteignent des valeurs si faibles qu'elles se situent à la limite de la mesurabilité - et qu'une fois que la norme Euro 6 sera appliquée, les véhicules roulant au diesel échapperont désormais eux aussi à ce reproche d'émettre localement des polluants, qui ne pourra plus être invoqué comme argument à l'appui d'une diffusion de la voiture électrique.

Du point de vue de la protection du climat, le paramètre déterminant est le bilan cumulé de toutes les émissions produites sur l'ensemble de la chaîne de production et d'utilisation, y compris donc aux stades qui, à l'amont, ressortissent au domaine énergétique ou à celui de la technique automobile. Même dans le cas même d'une voiture électrique, il n'est permis de parler de véhicule à "zéro émission" que si la totalité de l'électricité du réseau utilisé pour sa recharge est produite sans émettre aucun gaz à effet de serre.

Or, jusqu'à présent, l'électricité issue de sources renouvelables ne représente qu'une fraction très réduite de la production, puisque cette part fluctue entre 15 et 18 % environ, suivant la base de calcul choisie, selon que l'on se base, par exemple, sur la production électrique nette ou brute, ou que l'on tienne compte ou non des

importations et exportations de courant (voir le tableau 1 ci-dessous). S'il ne fait aucun doute que la contribution de l'électricité produite par l'éolien et d'autres sources d'énergie non fossiles connaîtra à l'avenir une forte augmentation, ce n'en sont pas moins le contexte actuel et ses échéances de temps qui doivent entrer en ligne de compte dans le débat actuel sur l'auto électrique "respectueuse de l'environnement" et la planification des futures mesures d'aides. Négliger cet impératif pour verser dans des conceptions superficielles du "zéro émission" a pour effet de détériorer le bilan climatique et de distraire des ressources au détriment d'options plus efficaces.

Avant d'examiner plus avant cette problématique¹³, on peut procéder au calcul approximatif décrit ci-après.

Comme indiqué précédemment, 20 à 25 kWh sont nécessaires pour propulser sur 100 km une voiture électrique dont les dimensions sont comparables à celles d'un véhicule classique essence ou diesel (donc, en l'occurrence, une automobile dans le genre de la Golf de Volkswagen) et qui, dans le cycle d'essai, affiche des performances routières analogues.

Les émissions de la production allemande d'électricité, dans la structuration actuelle de ses sources, se montent à quelque 600 g par kWh, chiffre qui, transposé au moteur électrique, donne de 120 à 150 g de CO₂ émis kilomètre parcouru. Officiellement la législation communautaire prescrit que pour 2015, il faudra parvenir à ce que les rejets de CO₂ des véhicules particuliers qui seront autorisés ne dépassent plus, en moyenne, la barre des 130 g/km mesurés dans le cycle d'essai; cependant, compte tenu des nombreuses dispositions dérogatoires prévues, il faut plutôt tabler sur une valeur de 140 g/km. Si l'on veut atteindre cet objectif, il sera nécessaire de vendre en grand nombre des petites voitures compactes et sobres, afin de compenser l'incidence des lourds véhicules du haut de gamme et de la catégorie des utilitaires sportifs, qui rejettent du CO₂ en abondance. Les petits modèles de ce type qui sont aujourd'hui commercialisés ont des performances d'émissions de dioxyde de carbone qui, l'on ne peut que s'en réjouir, sont situées

¹³ Pour parler en toute honnêteté, il convient de souligner que tous les scénarios concernant la production électrique du futur tiennent de l'approximation.

sous le seuil des 120 g/km, voire des 100 g/km. Or, il se fait qu'il s'agit là du segment de marché que visent également les voitures électriques.

Il apparaît clairement qu'introduire les voitures électriques sur la base de la ventilation actuelle des sources de production d'électricité ne permettra aucunement de progresser vers une réduction des émissions de gaz à effet de serre. On remarquera, soit dit en passant, que dans le rapide calcul effectué ci-dessus, il faudrait également intégrer les processus d'amont, c'est-à-dire, dans le cas des voitures électriques, les pertes de courant qui se produisent lors de la charge des batteries ou du fait de leur autodécharge et, en ce qui concerne les moteurs à combustion, les émissions résultant de l'extraction, du transport et du raffinage du pétrole brut.

Toutefois, un facteur est trop souvent négligé en l'état actuel des choses: du fait des contraintes liées à son autonomie et à sa mise en charge, la plupart des gens ne pourront utiliser la voiture électrique comme véhicule principal. Favoriser sa diffusion déboucherait donc sur une augmentation du nombre de deuxièmes et troisièmes autos en circulation, qui induit toute une série d'effets indésirables, au plan de l'environnement:

- Si le recours à la voiture électrique se traduit par une augmentation du parc automobile, il sera nécessaire, du point de vue de l'analyse des retombées des technologies et des politiques, de faire également entrer en ligne de compte les processus de fabrication de ces véhicules et d'établir leur bilan d'émissions sur la totalité de leur cycle de vie. La fabrication d'un véhicule électrique, batteries comprises, produit des rejets de gaz à effet bien plus importants que celle d'un véhicule conventionnel; mathématiquement parlant, ces rejets se répartissent sur un kilométrage annuel nettement moindre. On peut par conséquent en arriver à ce que même si elles recourent pour une part sensiblement plus élevée à de l'électricité produite à partir de sources renouvelables, ces autos s'avèrent présenter un bilan climatique globalement négatif.
- Dans l'esprit de bien des promoteurs de la voiture électrique, il conviendrait que pour en augmenter l'attrait auprès des acheteurs potentiels, les

communes offrent aux véhicules à propulsion électrique un accès privilégié aux centres des villes ou, inversement, rendent cette accessibilité plus onéreuse ou l'entravent de quelque autre manière pour les automobiles dotées d'un moteur à combustion. Ils invoquent à l'appui de leur raisonnement l'exemple du péage instauré dans le centre de Londres. De ce fait, la circulation de la grosse voiture familiale deviendra gratuite pour un ménage de banlieue et elle sera utilisée, par exemple, pour faire les courses. Le détail des retombées sociales que produira un tel dispositif n'est pas clair; elles influenceront sur le bilan climatique, vraisemblablement en sens négatif.

Conclusion provisoire sur la question de la préservation du climat

Le constat essentiel est et reste que l'utilisation de courant produit sans émissions de CO₂ constitue le seul moyen d'améliorer substantiellement le bilan de la voiture électrique. Or, d'un point de vue tant écologique qu'économique, il serait absurde, en utilisant du courant issus de sources renouvelables pour la charger, de restreindre l'utilisation de cette électricité verte dans d'autres secteurs où l'on pourrait parvenir à une réduction plus forte et moins onéreuse des émissions de CO₂, par kWh fourni.

La voiture électrique n'offre que des possibilités très limitées d'apport positif, s'agissant de réduire les émissions de gaz à effet de serre du trafic routier. Pour quelle raison le gouvernement fédéral allemand et l'industrie lui tressent-ils alors des lauriers avec une telle exaltation? L'analyse que nous réaliserons des motivations des parties prenantes au dossier aura notamment pour enjeu de décortiquer cet enthousiasme mais auparavant, il convient que nous procédions à une étude de coûts, pour les confronter aux conceptions que développent ces intervenants.

3.2 Coûts de la voiture électrique et répercussions pour la préservation du climat

Les projections allèguent sans cesse des chiffres censés prouver que la voiture électrique peut présenter un intérêt qui ne serait pas seulement écologique mais également économique.

À la lumière des données fondamentales dont on dispose à l'heure actuelle, pareilles prédictions apparaissent fort irréalistes. Le coût des batteries s'élève aujourd'hui à

quelque 1000 euros par kWh de capacité. Pour pronostiquer qu'il va évoluer très favorablement, on invoque inlassablement la "courbe d'apprentissage" d'autres technologies nouvelles: par cette notion, il faut entendre la réduction progressive qu'a connu leur prix de revient à mesure qu'elles ont été perfectionnées et ont bénéficié d'une production de masse, comme on peut en trouver un exemple dans le graphique de la fig. 14.

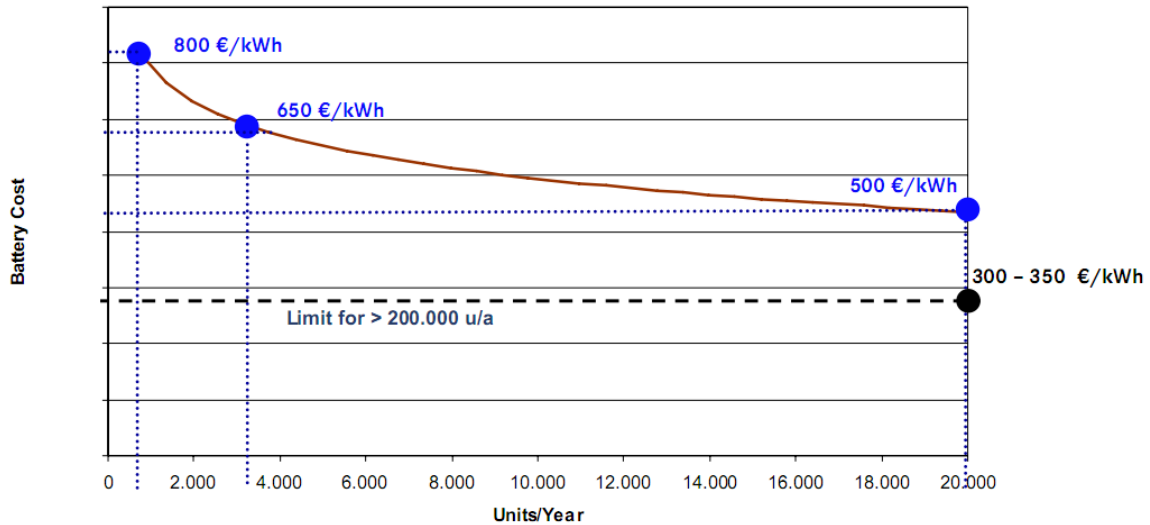
Une batterie a un coût qui ne se limite pas à son seul boîtier mais tient également à ses équipements annexes, dont l'électronique nécessaire à son fonctionnement et les dispositifs requis pour la chauffer et la refroidir. Si dans le cas de la première, indispensable au réglage du moteur électrique, il existe encore une grande marge de réduction de coûts, ces potentialités sont nettement plus réduites pour les seconds. Selon une estimation fort optimiste, les frais de batterie s'élèveront en 2020 à 400 euros par kWh. Pour atteindre cet objectif de prix, les coûts des boîtiers de batterie doivent être inférieurs à 250 euros par kWh.

Étant donné que la longévité des batteries au lithium dépend de leurs cycles de charge et de l'ampleur de leur décharge, elles ne sont actuellement déchargées qu'à 70 % de leur capacité, afin d'arriver à une durée de vie de dix ans. En effet, celle-ci sera d'autant plus brève qu'elles auront subi un niveau de décharge élevé. Dans certaines expériences, on vise à leur assurer un fonctionnement de dix ans, en ne leur permettant de se décharger qu'à environ 50 %.

Un tel objectif induit cependant que pour parcourir 100 km, un véhicule électrique devra être équipé d'une batterie d'une capacité de 50 kWh si sa consommation est de 25 kWh. Au prix de 400 euros par kWh, on aboutit, toujours pour une autonomie de 100 km, à un coût de 20 000 euros pour la batterie.

DAIMLER

Battery (System) Cost for Electric Vehicle at 20.000 units/a



Dr. Christian Mohrdieck, 090610

Fig. 14 – Exemple d'une courbe d'apprentissage pour le coût des batteries (source: Mohrdieck, Daimler AG)

Daimler

Coût de la batterie (système) pour un véhicule électrique produit à 20 000 unités par an

Coût de la batterie

Limite pour une production supérieure à 200 000 unités par an

Unités par an

Quelle est la portée de ces coûts de production de véhicule au regard des spéculations politiques sur la "mobilité électrique"? Pour ces questions de prix, devrait-on se reposer en toute confiance sur les constructeurs et, le cas échéant, leurs clients?

Tous les acteurs du débat sur la voiture électrique savent qu'il ne se trouvera pratiquement personne pour en acheter un exemplaire: le concept ne sera pas adopté via les mécanismes du marché. Tous s'accordent à tenir pour évident que l'État puisera dans sur son budget pour qu'elle s'impose commercialement et qu'en outre, il configurera l'environnement fiscal de telle manière que ses acheteurs trouveront un avantage économique à l'utiliser.

D'un point de vue économique-environnemental, la question qui se pose est de savoir si cette allocation de ressources est efficace; le problème, en effet, ne se limite pas aux frais exposés pour la fabrication du véhicule et au coût du carburant (ou de l'énergie). Pour ces derniers, on considère qu'il va de soi que la voiture électrique ne sera astreinte à aucun prélèvement du type de la taxe sur les produits pétroliers, comme si on ne pouvait lui imputer aucun frais d'infrastructures routières! On escamote purement et simplement ces aspects de l'équation, à savoir que le faible coût kilométrique de l'énergie consommée par la voiture électrique résulte de subventions publiques, qui devront être supprimées dès lors qu'elle accentuera sa pénétration sur le marché. Or, les calculs économiques des utilisateurs s'en trouveront alors nettement moins avantageux.

S'agissant des coûts d'infrastructure, on oublie – ou l'on occulte – qu'ils nécessitent d'énormes investissements, à la charge des budgets publics. On prétend souvent, bien à tort, que la configuration actuelle du réseau électrique serait suffisante pour faire face à la demande. Par ailleurs, environ 80 % de la population des grandes villes est logée dans des habitats collectifs et ne dispose pas d'un garage, d'où la nécessité de prévoir des emplacements de charge, qui exigeront dès lors des dépenses d'investissement supplémentaires, de l'ordre de 4000 à 6000 euros par véhicule.

Qui va supporter ces frais? Doit-on s'imaginer que chaque aire de stationnement sera dotée d'une borne utilisable par tout un chacun, et ce, dans l'espace des voiries publiques? À la différence d'une voiture qui fait en cinq minutes le plein dans une station-service à intervalle de deux semaines, voire plus, c'est quotidiennement, et des heures durant, qu'une auto électrique occupera sa colonne d'alimentation. Quand bien même l'on parviendrait à élaborer des solutions, par la technologie et les techniques de planification, la voiture électrique est et restera chère, pour l'acheteur

comme pour la collectivité.

Aussi s'impose-t-il de se demander à combien s'élèvent ses coûts par tonne de CO₂ évitée, par rapport aux réductions qui pourraient être opérées sur les voitures classiques, équipées d'un moteur à combustion. Plusieurs instituts allemands de recherche, parmi les plus réputés, ont calculé de manière approfondie quel serait le coût, par tonne de CO₂ épargnée, des différentes mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le domaine du transport (voir fig. 15).

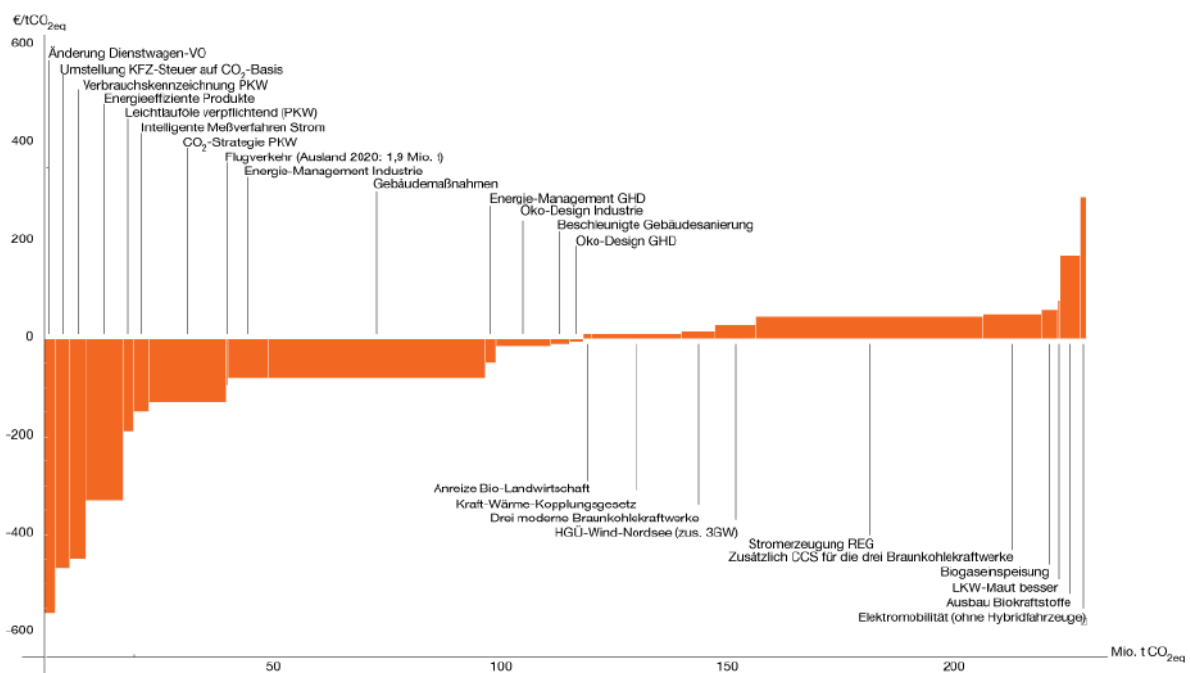


Fig. 15 – Coût à la tonne de CO₂ évitée des différentes mesures de réduction des émissions (source: Jochem et al. PIK 2008)

- euros/t équivalent CO₂
- Modification de la réglementation sur les véhicules d'entreprise
- Adoption des émissions de CO₂ comme base de calcul pour la redevance des véhicules
- Marquage obligatoire de la consommation des voitures
- Utilisation de produits à haute efficacité énergétique
- Obligation d'utiliser des huiles à faible viscosité pour le fonctionnement des moteurs

de voitures
Appareillages intelligents de mesure électrique
Stratégie en matière de CO₂ pour les voitures
Trafic aérien (à l'étranger en 2020: 1,9 millions de tonnes)
Gestion de l'énergie dans l'industrie
Mesures concernant les immeubles
Gestion de l'énergie dans l'artisanat, le commerce et les services
Conception écologique des produits industriels
Accélération de la rénovation immobilière
Conception écologique des produits dans l'artisanat, le commerce et les services
Mesures de stimulation pour l'agriculture biologique
Loi sur la production combinée d'électricité et de chaleur
Trois centrales modernes au lignite
Transport de courant continu haute tension d'éoliennes en mer du Nord (3 GW supplémentaires)
Production d'électricité à partir de sources renouvelables
Dispositifs de capture et stockage du carbone pour équiper trois centrales au lignite
Fourniture de biogaz
Amélioration des péages pour camions
Développement des biocarburants
Mobilité électrique (sans les véhicules hybrides)

Sans entrer dans le détail de chaque mesure envisagée, on peut faire le constat suivant: propulser les automobiles par de l'électricité stockée sur batterie constitue l'une des pistes les plus onéreuses pour réduire les émissions de CO₂.

4. Motivations des parties intéressées

4.1 Le monde politique

Le monde politique est sommé de manière très pressante de démontrer qu'il tient ses promesses. Le gouvernement allemand et l'Union européenne ont l'un et l'autre souscrit d'ambitieux engagements sur la réduction des gaz à effet de serre, respectivement allemands et communautaires. Dans le cadre du protocole de Kyoto, l'UE s'est mise en devoir, sur la période de 2008 à 2012, de diminuer ces rejets de

8 % par rapport à leur niveau de 1990 et pour concrétiser cette visée, ses États membres se sont assigné des objectifs climatiques nationaux. C'est ainsi que l'Allemagne a promis que sur ce même laps de temps, elle ferait baisser ses émissions de 21 %, par rapport à 1990. Sont couverts par cette réglementation les rejets de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄), de dioxyde d'azote (N₂O) (année de référence: 1990), ainsi que les hydrocarbures partiellement halogénés (HCFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

Durant la préparation de la conférence des Nations unies sur le climat tenue à Copenhague en décembre 2009, les États membres de l'UE sont convenus d'abaisser leurs émissions de gaz à effet de serre de 20 % d'ici 2020, par rapport à 1990. Au cas où d'autres grands États prendraient des engagements significatifs de réduction, l'UE a même ouvert la perspective de porter ce pourcentage à 30 %. En 2008, à Meseberg, le gouvernement fédéral allemand a fixé la barre à 40% de diminution. Alors que la plupart des secteurs ont précédemment réduit leurs émissions de gaz à effet de serre, celui des transports les a quant à lui augmentées à l'échelle de l'UE - dans le cas de l'Allemagne, il les a certes fait baisser mais bien moins que ne l'ont fait les autres branches.

De ce fait, des efforts politiques ont déjà été consentis, par le passé, pour réduire dans l'UE les émissions de gaz à effet de serre imputables au transport. Un des principaux piliers de l'action ainsi tentée consiste à améliorer l'efficacité technique des véhicules. Si dans le cas des poids lourds, le politique défendait la thèse que les prix élevés du carburant exerceraient une pression suffisante pour que ces véhicules améliorent leurs performances de consommation et, partant; de rejets de CO₂, le Conseil des ministres de l'UE a en revanche adopté en 1995, sur la proposition d'Angela Merkel, alors ministre de l'environnement du gouvernement fédéral allemand, un plafond d'émissions de CO₂ de 120 g/km en moyenne, auquel toutes les voitures particulières commercialisées dans l'UE seraient, pour leur part, tenues de se conformer à l'échéance de 2012 au plus tard. Pour s'y opposer, l'industrie automobile a entrepris à tous les échelons politiques un travail de plaidoyer qui a été couronné de succès, puisqu'en 1998, l'UE a accepté que les constructeurs européens souscrivent un engagement volontaire de ramener à 140 g/km, à l'horizon 2008, la quantité de CO₂ rejetée en moyenne par leurs véhicules neufs, en

contrepartie de quoi l'Union renonçait à prendre des dispositions par la voie législative. Dans les dix années qui ont suivi, les mesures que prit le secteur pour honorer l'obligation qu'il s'était lui-même assignée furent des plus timides, voire inexistantes. Les émissions moyennes de CO₂ ne baissèrent que modestement et en 2007, elles se situaient encore à un niveau excédant les 160 g/km, et même 170 g/km dans le cas des voitures de marques allemandes vendues sur le marché national.

À la suite de cet échec, le commissaire européen responsable de l'environnement, Stavros Dimas, a présenté en décembre 2007 la proposition de la Commission européenne qui instaurait pour 2012 une limite d'émissions de 120 g/km. Cependant, au terme de négociations aussi longues qu'ardues, au cours desquelles Angela Merkel, en tant que chancelière fédérale, s'éleva vigoureusement contre des limites d'émissions trop sévères, en particulier pour les grosses cylindrées, l'entrée en vigueur intégrale du plafonnement des émissions à 120 g/km fut repoussée à 2015. Cette valeur-limite, pour attrayante qu'elle puisse paraître sur le plan politique, n'en est pas moins assortie de nouveaux éléments propres à l'édulcorer. Ainsi, elle est censée être atteinte, à raison de 10 g/km, grâce à l'utilisation de biocarburants, de pneus à faible résistance au roulement, ainsi que d'indicateurs de changement de rapport. Cette prescription revient à atténuer de 10 g/km la valeur-limite initiale, si l'on considère que ce n'est pas l'industrie automobile qui commercialise les biocarburants, que leur production s'accompagne d'une série de retombées dommageables pour l'environnement et qu'on utilise de toute façon les pneus à faible résistance au roulement afin de parvenir à respecter les obligations de réduction des émissions de CO₂. Quant aux indicateurs de changement de rapport, on ne voit toujours pas clairement comment il sera possible de les faire entrer en ligne de compte, dans la mesure où l'industrie automobile ne dispose pas d'indications claires sur les gains d'émissions qu'ils permettraient d'engranger. Si l'on ajoute encore les 7 g/km supplémentaires qui peuvent être imputés pour des "éco-innovations", le véritable plafond d'émissions pour 2015 remonte à 137 g/km.

Il est à prévoir qu'avec cette baisse modérée des émissions de CO₂ qui est ainsi imposée, on arrivera tout juste à contenir les effets de l'expansion du parc automobile, cependant que l'augmentation escomptée du trafic de poids lourds aura

pour effet que les rejets de ce gaz imputables à la circulation routière n'en continueront pas moins à enfler.

De ce fait, le monde politique est prêt à s'accrocher à toutes les branches dès lors qu'on lui promet quelque réduction des émissions de gaz à effet de serre. La directive européenne sur la limitation des émissions de CO₂ des automobiles comporte également un passage qui prévoit une bonification pour les innovations favorables à l'environnement.

Cette disposition prévoit de récompenser certains modèles de voiture: dans le calcul de la moyenne d'émission de la flotte d'un constructeur, les automobiles qui émettent moins de 50 g de CO₂ par kilomètre seront comptabilisées pour 3,5 unités en 2012 et 2013, pour 2,5 unités en 2014 et pour 1,5 unité en 2015. Dans son bilan de CO₂, un constructeur automobile pourra n'imputer aucune émission à un modèle électrique, quelle que soit l'origine de l'électricité qui charge ses batteries. Si l'on utilise, pour alimenter ces véhicules, du courant qui provient de sources renouvelables, un volume équivalent à 2,5 fois cette consommation sera porté en compte dans le quota de 10 % d'énergie renouvelable auquel est astreint le secteur du transport, alors que si elle est utilisée par le rail, cette électricité renouvelable est comptabilisée à sa valeur simple!

L'écueil est ici que s'ils sont octroyés en volume appréciable pour des voitures électriques, ces facteurs de bonification vont accroître les émissions de CO₂ des véhicules conventionnels - et les effets de ce phénomène seront d'autant plus aigus que les automobiles électriques parcourent annuellement un kilométrage nettement moindre, par exemple, qu'un modèle diesel, de sorte que la réduction globale des émissions de dioxyde de carbone s'en trouvera encore affaiblie.

4.2 L'industrie automobile

Le développement de nouveaux concepts de véhicules, comme l'est la voiture électrique, induit un fort engagement en ressources financières et humaines. En première analyse, il apparaît donc étonnant que l'industrie automobile européenne et, dans le cas présent, les constructeurs allemands en particulier aient réagi si positivement aux attentes des politiques. Selon tous les pronostics, la voiture électrique n'occupera qu'une place mineure dans les ventes de véhicules au cours

des quinze à vingt prochaines années. Les très ambitieuses vues que le gouvernement fédéral allemand expose dans son "Plan national de développement de la mobilité électrique", adopté en août 2009, prévoient qu'en 2020, il circulera en Allemagne un million de véhicules électriques. Or, le pays compte actuellement 41 millions d'automobiles immatriculées. En d'autres termes, ce sont les véhicules conventionnels qui, en 2020, continueront à assurer l'essentiel de l'activité de l'industrie automobile allemande.

Pour une bonne part, une voiture ne se vend pas seulement sur sa valeur d'usage mais aussi sur l'image que lui associent son acheteur et son entourage. Pour les fabricants d'autos, l'enjeu consiste dès lors à épouser les évolutions des représentations sociales. Qu'au sein de la société, chaque citoyen prenne toujours davantage conscience de la problématique du changement climatique, et voilà les constructeurs contraints de proposer des solutions en la matière. Il ne s'en ensuit pas qu'ils parviendront ipso facto à vendre les véhicules concernés, car la décision d'achat fait intervenir bien d'autres facteurs, en particulier le prix et la valeur d'usage. L'Automobile-club général allemand (ADAC) a récemment mené auprès de ses membres une enquête sur leurs intentions d'achat concernant la voiture électrique, dont il est ressorti que s'ils sont près de 90 % à en avoir une perception positive, presque 40 % des répondants se refuseraient, pour en acheter une, à déboursier davantage qu'il ne leur serait demandé pour un véhicule comparable à propulsion classique. Ils ne seraient que 10 % à se satisfaire d'une autonomie limitée à 100 kilomètres, tandis que pour un cinquième, ils exigent un rayon d'action de 200 kilomètres et que la majorité d'entre eux (31,6 %) escompte pouvoir parcourir 500 kilomètres sans être soumis à la fastidieuse corvée de la pause pour recharge.

La conclusion qui se dégage dès lors est qu'il n'est pas possible de faire concorder les attentes des acquéreurs potentiels de véhicules électriques avec les paramètres techniques et financiers qui, pour longtemps encore, resteront ceux des voitures de ce type.

Nonobstant, un fabricant peut très bien soigner son image en n'écoulant qu'un petit nombre de véhicules novateurs: la Prius de Toyota offre une illustration frappante d'une telle démarche. Alors qu'en 2007, elle était pratiquement au coude à coude

avec Volkswagen pour les taux d'émission de CO₂, cette firme a réussi à monter en épingle les ventes de la Prius, pourtant relativement modestes, pour rehausser son prestige. Des modèles comme la Blue-Motion de Volkswagen ou la BlueEfficiency de Mercedes répondent à des visées analogues.

Il en résulte par ailleurs que pour un constructeur automobile, toute l'habileté consistera à être le premier à écouler un petit nombre de voitures électriques, pour répondre aux aspirations du politique tout en veillant bien à ne pas susciter d'attentes chez sa clientèle quant à la possibilité que cette motorisation puisse se substituer à brève échéance à l'automobile traditionnelle.

Pour ces industriels, il importe de combler les espérances des responsables politiques, car ils pourront éviter ainsi, en leur faisant miroiter la perspective d'un avenir meilleur, qu'on ne leur impose des normes plus sévères d'émissions de CO₂. Une autre pièce maîtresse de cette stratégie consiste à faire valoir, en supputant en retirer des allègements fiscaux supplémentaires, qu'il est crucial d'occuper une position de pointe en matière d'innovation et que le secteur automobile réalise d'excellentes performances à l'exportation. Le risque est grand toutefois, dans ce cas de figure, que le consommateur n'en vienne à concevoir des espoirs irréalisables qui, une fois déçus, pourront se traduire par des réticences à acheter. Par ailleurs, le politique pourra invoquer les promesses technologiques de cet ordre pour justifier l'instauration de quotas de vente: tel est le cas, par exemple, en Californie.

4.3 Le secteur électrique

À l'issue du processus dit de "libéralisation", le secteur électrique allemand a su s'appuyer sur sa puissance pour réaliser au cours des dernières décennies des profits encore plus plantureux qu'aux temps du monopole classique. Le marché est sous la coupe de quatre géants et il n'y existe pratiquement aucune concurrence. Si les tarifs facturés aux consommateurs privés et les bénéfices des quatre grandes compagnies explosent ainsi en parallèle, force est de conclure que le pilotage du secteur par les acteurs politiques est, quelque part, défaillant. L'industrie électrique constitue la preuve vivante qu'il est possible, sans augmenter le volume des ventes, de gagner toujours plus d'argent.

Aujourd'hui comme hier, la production électrique allemande repose dans une large mesure sur des sources d'énergie fossiles, et donc émettrices de CO₂. Le tableau 1 décrit les évolutions récentes. L'énergie éolienne a nettement accru sa part dans la production électrique, tout comme le gaz naturel. En revanche, celle de l'énergie photovoltaïque est toujours aussi faible.

Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland

Energieträger	2006 Mrd. kWh	2007* Mrd. kWh	2008* Mrd. kWh
Braunkohle	151,1	155,1	150,0
Kernenergie	167,4	140,5	148,8
Steinkohle	137,9	142,0	128,5
Erdgas	73,4	75,9	83,0
Mineralöl	10,5	9,7	10,5
Wasserkraft	26,8	28,1	27,0
Windkraft	30,7	39,7	40,2
Übrige	39,1	46,4	51,1
Bruttoerzeugung	636,8	637,6	639,1
Stromimport	46,1	44,3	40,2
Stromexport	65,9	63,4	62,7
Stromimportsaldo	- 19,8	- 19,1	- 22,5
Stromverbrauch einschl. Netzverluste	617,0	618,4	616,6

**Production électrique brute
en Allemagne, par sources d'énergie**

Source d'énergie	2006 Milliards de kWh	2007* Milliards de kWh	2008* Milliards de kWh
Lignite	151,1	155,1	150,0
Énergie nucléaire	167,4	140,5	148,8
Charbon	137,9	142,0	128,5
Gaz naturel	73,4	75,9	83,0
Pétrole	10,5	9,7	10,5
Hydroélectricité	26,8	28,1	27,0
Éolien	30,7	39,7	40,2
Autres	39,1	46,4	51,1
Production brute	636,8	637,6	639,1
Importations d'électricité	46,1	44,3	40,2
Exportations d'électricité	65,9	63,4	62,7
Solde des importations et exportations	- 19,8	- 19,1	- 22,5
Consommation électrique, y compris les pertes de réseau	617,0	618,4	616,6

Tableau 1 – Parts des différentes sources d'énergie dans la production électrique en Allemagne (source: Stat. Bundesamt [Office fédéral de statistique], BGEW 2009)

Le secteur électrique est parvenu non seulement à répercuter sur les clients domestiques les coûts des aides allouées aux énergies renouvelables au titre de la loi afférente mais a dégagé en sus un profit financier sur les certificats d'émissions de CO₂ que l'État lui octroie (gratuitement) – en pratique, il s'agissait d'un cadeau, tout à fait exceptionnel, de la part des pouvoirs publics; dans le futur, il faudra toutefois payer réellement une redevance pour tout rejet de CO₂ auront un coût: c'est un point que l'UE a pu imposer.

Le marché étant saturé, le secteur électrique se pose aujourd'hui une question: comment dégager de nouvelles rentrées? Pendant des dizaines d'années, on a assisté à des efforts sans cesse réitérés, par exemple de la part de la compagnie

d'électricité RWE, pour lancer la voiture électrique sur batteries, sans qu'ils soient jamais couronnés de succès, car les bases technico-économiques requises n'ont jamais été réunies. D'une manière générale, les grands conglomérats du secteur de l'électricité n'ont joué qu'un rôle marginal dans le domaine du transport, abstraction faite de la propulsion électrique qui est celle du métro, du chemin de fer urbain et du tram - la société des chemins de fer allemands (DB) assure quant à elle sa propre production électrique, sur un réseau séparé.

On note désormais, depuis trois ou quatre ans, une mobilisation accrue en faveur du dossier de la voiture électrique, même si toutes ses parties prenantes ont bien conscience que ce marché, étant de taille modeste, restera quantité négligeable ces prochaines années. L'Institut pour l'environnement et l'énergie (IFEU) a calculé, pour le compte du ministère allemand de l'environnement, que la consommation du million de voitures électriques sur lequel table le gouvernement fédéral pour 2020 (nous reviendrons sur ce point ci-après) représentera nettement moins de 1 % de la production électrique écoulée¹⁴.

Dans ce domaine, les grandes sociétés électriques ont elles aussi pour préoccupation prioritaire d'améliorer leur image. Ainsi, la RWE fait sa publicité avec le slogan "Expérimentez le carburant de demain: la RWE présente l'électricité automobile." Alors même qu'aucun volume de vente significatif ne pourra être réalisé dans un futur prévisible, on construit des bornes de recharge et la RWE effectue à travers toute l'Allemagne des tournées de promotion par lesquelles elle entend donner l'impression qu'elle sera le fournisseur d'énergie de l'automobiliste de demain. Ce faisant, elle détourne l'attention du public des projets qui revêtent une véritable pertinence économique pour elle: la construction de nouvelles centrales au charbon (houille et lignite) et la prolongation de la durée de fonctionnement des centrales nucléaires.

¹⁴ IFEU (2007): Electromobilität ("La mobilité électrique") et document de travail n° 5 élaboré dans le cadre du projet "Équilibre énergétique: solutions structurelles optimales pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique", Heidelberg.

5. L'argument écologique: les voitures électriques pour la production d'électricité renouvelable

5.1 Premier argument (répété): les voitures électriques, véhicules à émissions zéro

Dans le chapitre 3.1, nous avons déjà utilisé un calcul approximatif pour montrer que dans la perspective actuelle, la propulsion électrique appliquée aux véhicules particuliers n'apporte pas d'avantages écologiques. Si, à présent, on prend également en compte le coût élevé et les retombées secondaires de cette technique, on est même amené à conclure qu'elle produit des effets dommageables pour la préservation du climat.

La vision écologique de la voiture électrique ne fonde toutefois pas ses estimations sur une électricité produite par le charbon ou l'atome, le premier émettant par trop de CO₂ (et autres polluants), tandis qu'il ne peut être envisagé, dans la situation juridique actuelle, d'en revenir à l'énergie nucléaire. Les partisans de la propulsion électrique se veulent soucieux de l'avenir: la voiture électrique se devra d'utiliser de l'électricité propre, produite à partir de sources renouvelables. Dans les comparaisons de rejets de CO₂ de ces véhicules, on se base donc de préférence sur de l'électricité produite sans émissions pour les confronter à celles des automobiles actuelles à motorisation essence ou diesel.

On se posera toutefois la question de savoir si l'on peut bel et bien disposer pour cette tâche d'un volume supplémentaire d'électricité issue de sources renouvelables. La voiture électrique nécessitera en effet du courant propre "supplémentaire", car les plans allemands de préservation du climat ont d'ores et déjà affecté à d'autres usages l'électricité de ce type qui est disponible.

D'une part, il s'agit d'utiliser l'énergie éolienne et solaire comme substitut aux centrales à lignite, puis à charbon, dont les émissions de CO₂ spécifiques (c'est-à-dire par unité énergétique) sont élevées. Un autre aspect des stratégies de protection du climat dont il n'est guère débattu est que le programme dit "de Meseberg", visant à atteindre un objectif de réduction des gaz à effet de serre de

40 % d'ici 2020, prévoit de remplacer les appareils de chauffage électrique par accumulation de courant de nuit, qui sont responsables de quelque 3% des émissions allemandes de dioxyde de carbone. Or, ces accumulateurs nocturnes présentent l'avantage, pour les compagnies d'électricité, d'exploiter les plages horaires où le réseau est peu sollicité et constituent donc pour elles un type de débouché très rentable pour écouler leur production. Depuis quelques années, le chauffage électrique a cependant cessé d'être soutenu, et à juste titre, car son efficacité énergétique globale est très mauvaise.

Demain, l'utilisation de la voiture électrique pourrait venir combler ce manque à gagner. Aussi conviendrait-il que leur recharge s'effectue plutôt nuitamment; il s'en ensuit que leur modèle de consommation électrique démarquera celui des chauffages électriques à accumulation nocturne. En effet, le courant produit la nuit est de l'électricité dite "de charge de base", qui est fournie par des centrales à lignite ou houille, ou encore par des centrales nucléaires, et produit des émissions de gaz à effet de serre plus élevées que celles du bouquet électrique moyen de l'Allemagne, étant donné que ce dernier, pour sa part, comporte aussi des centrales au gaz, et ce, dans des proportions grandissantes. Ces dernières installations ont une production plus avantageuse du point de vue des émissions de CO₂ mais relativement chère; elles présentent par ailleurs l'avantage de pouvoir monter ou descendre en charge plus rapidement que celles fonctionnant au charbon¹⁵. De ce fait, elles sont indispensables pour faire face aux pics journaliers de consommation. Pour l'industrie électrique, les centrales qui se prêteraient idéalement à la recharge des batteries de voiture sont celles qui brûlent du lignite ou de la houille et assurent la charge de base. Comment se présente dès lors le bilan écologique de la voiture électrique?

5.2 La comparaison exacte: propulsion électrique contre moteur à explosion et moteur diesel, sur le plan de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre

Pour évaluer l'incidence climatique de la voiture électrique, nous allons procéder ci-après à un calcul qui en compare les émissions de CO₂ avec celles produites par des véhicules équipés de moteurs classiques à combustion. Les différentes déclinaisons

¹⁵ Le recours aux centrales nucléaires n'est intéressant que pour la seule fourniture de la charge de base.

du modèle Smart ForTwo se prêtent bien à la comparaison, car le véhicule existe en une version propulsée par la technique traditionnelle et une autre à propulsion électrique, encore qu'elle reste jusqu'ici au stade des essais de terrain. Abstraction faite de l'autonomie plus réduite de la seconde, qui est inhérente à son schéma de motorisation, elles sont totalement comparables en ce qui concerne la charge admise et les performances de conduite.

Selon les indications du constructeur, la Smart ForTwo électrique consomme 12 kWh d'énergie électrique aux 100 km (Daimler AG, 2008). Étant donné qu'en Allemagne, la production d'un kWh électrique se traduit en moyenne¹⁶ par l'émission de 596 g de CO₂, cette voiture rejette donc 71,5 g de ce gaz pour chaque kilomètre parcouru.

CO₂ émis par la version électrique utilisant une électricité produite avec des émissions à la moyenne actuelle

71,5 g CO₂ / km

Pour la version diesel, les émissions de CO₂ peuvent être calculées comme suit:

- consommation, selon les données du constructeur: 3,3 l / 100 km (Daimler AG 2009),
- le carburant diesel présente une teneur en carbone de 86,3 %,
- la densité du diesel est de 830 kg/m³, ou 830 g/l,
- le facteur spécifique de conversion carbone - CO₂ dans le processus de combustion se monte à 3,664.

Pour la version diesel, on obtient ainsi:

Émissions de CO₂ de la version diesel

$$\frac{3,3l}{100 km} * 86,3\% * 830 \frac{g}{l} * 3,664 = 86,6 g/km$$

À ce stade, les émissions de CO₂ au km sont moins importantes pour le modèle électrique que pour le diesel. On est toutefois fondé à se demander si la palette de sources de production d'électricité utilisée pour la charge de la voiture électrique est

¹⁶ Valeur moyenne pour l'Allemagne, arrêtée en 2006, selon les chiffres de l'Office fédéral de l'environnement.

correctement indiquée. L'ADAC a également soulevé des observations de ce type et pour ses calculs, elle a pris en considération une électricité produite exclusivement sur la base de charbon et a intégré dans sa comparaison la version essence de la Smart ForTwo. Voici les résultats obtenus:

Antriebs-Version	Smart ForTwo electric drive E-Motor	Smart ForTwo electric drive E-Motor	Smart ForTwo coupé 1.0 mhd Otto	Smart ForTwo coupé 0.8 cdi Diesel
Motorleistung	30 kW	30 kW	52 kW	33 kW
Eingesetzte Energie	Elektrisch/ Strom-Mix Deutschland	Elektrisch/ Steinkohle	Benzin	Diesel
CO2 – Emission	71 g/km	107 g/km	103 g/km	88 g/km

Mode de propulsion de la version	Smart ForTwo Propulsion électrique Moteur électrique	Smart ForTwo Propulsion électrique Moteur électrique	Smart ForTwo Coupé 1,0 Transmission micro-hybride Essence	Smart ForTwo Coupé 0,8 Injection directe Diesel
Puissance du moteur	30 kW	30 kW	52 kW	52 kW
Énergie utilisée	Électricité, bouquet allemand de production électrique	Électricité, à base de charbon	Essence	Diesel
Émissions de CO₂	71 g/km	107 g/km	103 g/km	88 g/km

Tableau 2 – Comparaison des versions électrique, essence et diesel de la Smart

Si l'électricité nécessaire à sa charge provient de centrales au charbon, la version électrique de la Smart ForTwo obtient les résultats les plus médiocres pour ce qui est de la préservation du climat. Indépendamment de ce bilan d'émissions de CO₂, il est également intéressant de se pencher sur la consommation énergétique de ces véhicules sur toute la durée de leur cycle de vie. Ces rejets de CO₂ plus élevés que

produit une voiture électrique dont le courant est fourni par le charbon se reflètent également dans la quantité d'énergie primaire qu'elle nécessite, comme le montre le calcul que l'on va effectuer.

Dans le cas de la **version diesel** de la Smart, qui consomme **3,3 l / 100 km** d'un carburant dont la densité est de 0,830 g/l et le pouvoir calorifique de 45,9 MJ/kg,

l'énergie consommée, en MJ par 100 km, est de:

$$= \frac{3,3l}{100 km} * 0,830 \frac{kg}{l} * 45,9 \frac{MJ}{kg} = 125,7 \frac{MJ}{100km}$$

Le calcul des besoins de la **version électrique** en énergie primaire peut s'établir, pour le cas de figure où l'électricité est produite exclusivement à base de charbon, par le calcul ci-après qui, étant donné:

- que la consommation est de 12 kWh par 100 km = 43,2 MJ par 100 km,
- qu'en dépit du très haut rendement des accumulateurs modernes lithium-ion, on posera que les pertes à la charge et à la décharge se situent aux alentours de 20 % (Merten, et al., 2009, p. 6),
- que les pertes de transfert lors de distribution électrique se montent, selon les estimations, à 5 %;
- et que le rendement des centrales allemandes au charbon est estimé à 40 %,

détermine que **l'énergie consommée, en MJ par 100 km, est de**

$$= \frac{43,2 MJ}{100 km} / 80\% / 95\% / 40\% = 142,1 \frac{MJ}{100km}$$

Si l'on envisage l'efficacité de la motorisation de propulsion en tant que telle, la voiture électrique l'emporte certes largement sur un véhicule doté d'un moteur à combustion interne¹⁷ mais elle perd cet avantage et devient même le mauvais choix dès lors que l'on prend en considération l'ensemble de la filière, "du puits à la roue". La raison en réside essentiellement dans les pertes de rendement qui se produisent

¹⁷

Pour divers motifs, toutes les comparaisons entre la propulsion par moteur électrique et moteur à combustion ne sont possibles que sur la base de postulats qui portent fort à conséquence. Ainsi, ces exercices ne tiennent pas compte de l'infériorité des véhicules électriques en ce qui concerne les performances de conduite et l'autonomie. Pour comparer exactement les deux motorisations, il faudrait dès lors se fonder, dans le cas des versions essence ou diesel, sur des voitures de moindre puissance et dotées de petits réservoirs. En ce qui concerne l'auto électrique, le calcul devrait considérer que les éléments de confort tels que le chauffage, la climatisation, etc. disposent d'une alimentation électrique distincte de celle du moteur: en hiver, la distance qu'elle peut parcourir est réduite de moitié si elle est chauffée; de même, il faudrait faire entrer en ligne de compte la baisse de capacité qui affecte la batterie lorsqu'il fait froid.

tout au long des circuits de distribution de l'électricité, entre sa production et sa transformation en énergie mécanique dans la voiture électrique.

D'un point de vue purement arithmétique, la voiture électrique afficherait des performances énergétiques équivalentes à celles de la voiture classique à partir du moment où la centrale électrique atteint un rendement d'environ 45 %, chiffre auquel parviennent sans problème les installations modernes brûlant du charbon et que dépassent celles qui fonctionnent avec des turbines à gaz à cycle combiné ou sur le principe de la cogénération de chaleur et d'électricité.

L'avantage dont peuvent éventuellement se prévaloir les voitures électriques du point de vue des émissions de CO₂ est donc fonction de l'énergie primaire utilisée dans la centrale qui produit le courant utilisé et de son efficacité énergétique. S'agissant de faire baisser le volume total de CO₂ émis, le recours à cette motorisation n'a donc de sens que si l'on modifie radicalement, en faveur des énergies renouvelables, la palette des sources utilisées pour la production électrique. C'est ce même constat que l'on retrouve dans un décret du cabinet gouvernemental fédéral sur l'"électromobilité": "Pour atteindre les objectifs ambitieux que s'est assignés le gouvernement dans le domaine de la politique énergétique et climatique, il est nécessaire que la couverture des besoins supplémentaires en énergie électrique dans ce secteur soit assurée par des énergies renouvelables",

le mot "supplémentaires" devant être ici compris au sens que les véhicules électriques sur batteries ne pourront soustraire de l'électricité renouvelable destinée à d'autres usages. Indépendamment de ses dimensions touchant à la politique environnementale et climatique, cette observation a également des implications économiques: toutes les études menées jusqu'à présent montrent que lorsqu'elle est affectée à des applications fixes, l'électricité issue de sources renouvelables évite davantage d'émissions de CO₂ que si elle est sert à la propulsion de voitures (la question des coûts de la voiture électrique a déjà été abordée par ailleurs).

La situation peut éventuellement se présenter sous un jour différent dans des pays comme la Suisse ou la Suède, où les sources d'énergie renouvelables assurent dès à présent une part importante de la production électrique mais même dans ce cas, il ne faut pas oublier qu'en Europe, les réseaux de distribution électrique sont

interconnectés. Il résulte que si la Suisse, par exemple, utilise sa production électrique pour faire fonctionner des voitures électriques, elle diminuera d'autant le volume d'électricité renouvelable dont elle dispose pour l'exportation vers l'Allemagne ou d'autres pays.

L'automobile étant un produit mondial – un des arguments invoqués pour le développement de la voiture électrique n'est-il pas qu'elle aboutira également à créer un marché planétaire? –, les constructeurs souhaiteront que les modèles motorisés à l'électricité soient également exportés dans des États, comme l'Égypte, la Chine ou l'Inde, c'est-à-dire dans des nations où elles provoqueront des émissions de CO₂ nettement plus élevées qu'une auto moderne équipée d'un moteur à combustion, étant donné que la production locale d'électricité est axée sur le charbon.

5.3 Perspectives pour la production électrique du futur

Selon l'"Étude pilote 2008 sur l'évolution de la stratégie de développement pour les énergies renouvelables", il est permis d'escompter qu'à la condition que les dispositions de la loi sur les énergies renouvelables restent inchangées d'ici à 2015, l'Allemagne atteindra son objectif de produire au moins 30 % de sa consommation électrique brute à l'aide d'énergies renouvelables, à l'échéance de 2030 (Nitsch, 2008). À l'horizon 2050, le texte table même sur une part de plus de 80 % pour ces mêmes énergies (voir fig. 17).

Les considérations qui suivent prennent pour hypothèses de départ les observations consignées dans cette étude pilote, commandée – et souvent utilisée – par le gouvernement allemand. Elle pronostique une montée en puissance des plus rapides pour les énergies renouvelables et postule que le scénario de sortie du nucléaire restera valable demain comme il l'est aujourd'hui.

On attirera l'attention sur les points suivants: les centrales à houille et lignite, qui sont de grosses émettrices de CO₂ devraient rester en service jusqu'au-delà de 2040, pour contribuer à la charge de base du réseau; par ailleurs, d'ici à 2030 au moins, il ne sera possible, fût-ce la nuit, de dégager aucun surplus d'électricité renouvelable pour approvisionner de nouveaux consommateurs à émissions zéro. Écologiquement

parlant, il est donc absurde que la mobilité électrique vienne prendre la place laissée vacante par le chauffage de nuit, dont on a soulagé très judicieusement le réseau.

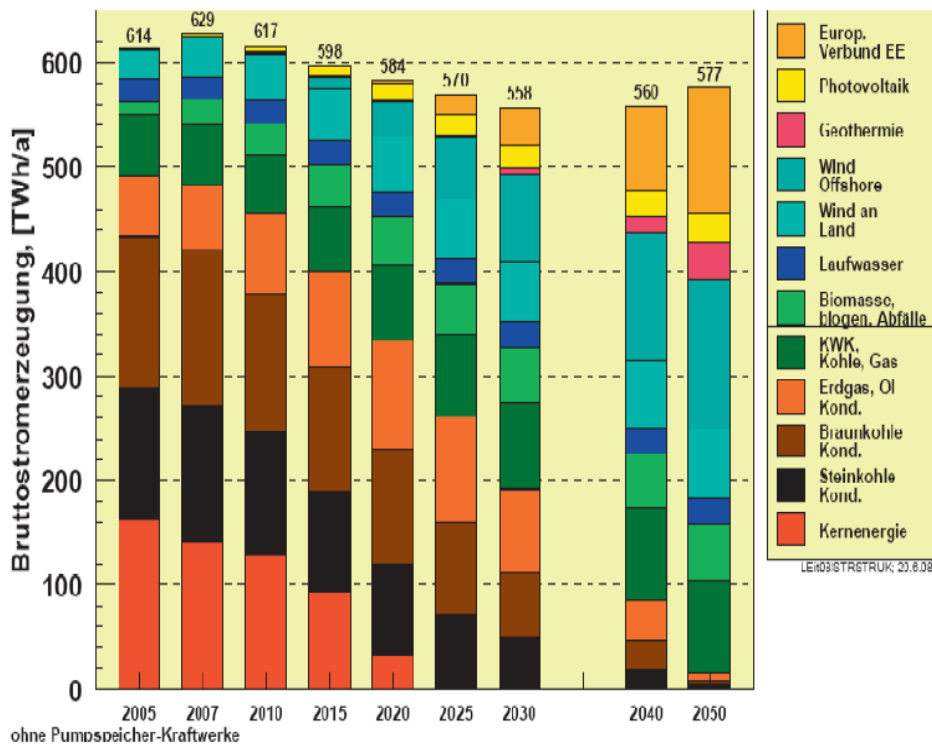


Fig. 16 - Structure de la production électrique brute dans le scénario pilote 2008 (Nitsch et al. 2008)

Production électrique brute (TWh/a)
Interconnexion européenne des énergies renouvelables
Photovoltaïque
Géothermie
Éolien marin
Éolien terrestre
Hydroélectricité
Biomasse, déchets biogènes
Cogénération électricité-chaaleur (charbon, gaz)
Gaz naturel, pétrole – centrales à condensation
Lignite – centrales à condensation
Charbon – centrales à condensation

Énergie nucléaire

(Les centrales de pompage-turbinage ne sont pas prises en compte.)

5.4 Le second argument écologique: les voitures électriques, outils de lissage du réseau¹⁸

Une bonne partie des sources d'énergie renouvelables qui sont utilisées pour la production d'électricité sont sujettes à des fluctuations naturelles, dues en particulier aux conditions météorologiques: c'est le cas notamment de l'éolien et du solaire. Le réglage du réseau électrique, consistant à équilibrer son alimentation en courant et les prélèvements qui y sont effectués, gagne dès lors en complexité, car, dans ce cas, la consommation n'est plus le seul versant qui ne se prête pas à être réglé directement: il en va de même, dans une mesure croissante, de l'autre versant, celui de la production. À mesure que l'électricité produite par des énergies renouvelables y accroît sa présence, le réseau a également de plus en plus besoin d'électricité dite "de réglage", c'est-à-dire celle qui permet, y compris à bref délai s'il y a lieu, de compenser les variations qui se produisent du côté de la demande mais aussi de l'offre, dans le cas du courant produit par des sources renouvelables.

18

Les observations développées dans ce chapitre ont pour source essentielle Pfister 2009, Fernuniversität Hagen.

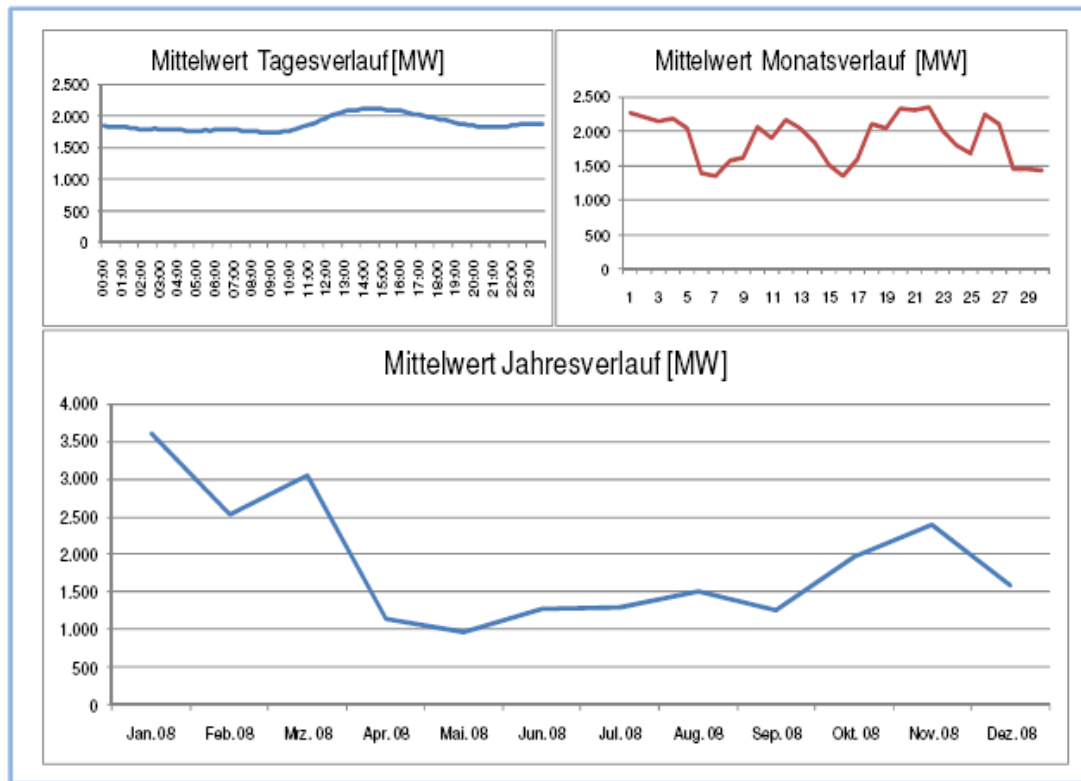


Fig. 17 – Alimentation en électricité produite par l'énergie éolienne dans la zone de réglage du réseau E.ON en 2008 (source: Pfister 2009, selon des données tirées de la société e.on Netz GmbH, 2009)

Valeur moyenne – évolution journalière

Valeur moyenne – évolution mensuelle

Valeur moyenne – évolution annuelle

Le chapitre ci-après explique, en se fondant sur l'exemple de l'énergie éolienne chez E.ON, quelles sont les fluctuations auxquelles est soumise la production d'électricité à partir de sources renouvelables. Comme le montrent les estimations de la fig. 17, qui expose les chiffres de cette production électrique réalisée en 2008 grâce à la force du vent dans la zone de réglage de la société E.ON Netz GmbH, le volume de courant produit par l'éolien présente des écarts importants, tant par journée que d'une saison à l'autre. Si les variations de rendement entre le semestre hivernal et le semestre estival se manifestent à avec une certaine régularité, celles qui se produisent au cours d'un mois donné sont de nature plus aléatoire et dépendent des paramètres météorologiques du moment.

En revanche, la quantité d'électricité qui est récoltée montre un profil relativement constant à l'échelle de la journée, sans qu'il y ait lieu d'ailleurs de s'en étonner, dans la mesure où, en règle générale, la vitesse du vent n'accuse pas de mouvement prononcé en l'espace de quelques heures. Les valeurs moyennes indiquées par la fig. 17 ne se rapportent qu'à 2008. Sans infirmer ce postulat de base de la variabilité journalière et saisonnière, on ajoutera que s'agissant de la production électrique, des oscillations nullement négligeables sont également observées suivant les années.

Ces observations valent également pour l'électricité d'origine solaire, que la technologie utilisée soit thermosolaire ou photovoltaïque: on relève que son rendement fluctue lui aussi, essentiellement en fonction de la saison et des jours, mais moins suivant le moment de la journée auquel on se situe, notamment parce que dans les centrales thermosolaires, l'énergie thermique peut être stockée plusieurs heures dans de grands réservoirs de chaleur, par exemple pour la nuit ou en cas de conditions météorologiques défavorables.

Même si l'on peut présumer que ces irrégularités d'alimentation du réseau en énergie éolienne s'atténuent lorsqu'elle est fournie par des parcs implantés en mer, ce problème de gestion de la charge n'en prendra pas moins de plus en plus d'acuité à mesure que les sources d'énergie renouvelables de nature fluctuante monteront en puissance dans la production électrique brute. Selon le "scénario-pilote 2008" (Nitsch 2008), cette part dépassera les 60 % à l'horizon 2050. Face à de tels ordres de grandeur, il ne sera pas possible de garder la maîtrise de la situation sans introduire de nouveaux systèmes de gestion de la charge, si l'on considère que les centrales de charge de pointe fonctionnent avec des énergies fossiles - c'est le cas des turbines à gaz - ou qu'elles se heurtent à certaines limites d'ordre structurel, par exemple en ce qui concerne les centrales de pompage-turbinage.

Dans le domaine des motorisations de substitution, le débat tourne essentiellement autour de deux technologies, la première étant la filière de l'hydrogène et la seconde, la mobilité électrique, fondée sur l'utilisation de batteries et obéissant au schéma du "véhicule sur réseau" ("vehicle to grid"). Nous n'approfondirons pas ici la question de l'économie de l'hydrogène.

L'idée qui est développée actuellement en lien avec la voiture électrique est qu'il serait possible d'utiliser les batteries des voitures particulières pour atténuer les fluctuations que la production de courant éolien et solaire inflige au réseau d'électricité. Ce ne serait donc plus uniquement au moment où il faudrait les recharger que les autos électriques ("vehicle") seraient branchées sur le réseau public ("to grid"): elles y seraient raccordées en permanence (hormis, bien entendu, lorsqu'elles seraient en circulation), leurs batteries servant alors de réservoirs pour le stockage des excédents ponctuels d'énergie électrique. La charge des véhicules devrait alors s'effectuer dans des plages où la demande d'électricité est faible. Aux heures où elle culmine, les batteries seraient déchargées par le réseau public, auquel elles restitueraient donc du courant. Selon ce principe, l'énergie électrique circulerait donc dans les deux sens, du réseau à la batterie de la voiture et vice versa, selon leurs besoins respectifs. Des bornes de charge devraient être installées tout à la fois chez les particuliers et dans les aires de stationnement des entreprises et les lieux publics, afin que les voitures puissent être connectées aussi souvent que possible au réseau. Le pilotage du processus de charge et de décharge serait assuré par l'opérateur du réseau, via des dispositifs télématiques.

L'énergie électrique des batteries des véhicules propulsés à l'électricité devrait notamment servir à absorber les pointes de charge et à procéder à un lissage des fluctuations sur le réseau. On fera observer en premier lieu que l'approche "véhicule sur réseau" ajoute "simplement" un outil supplémentaire à la panoplie dont disposent les réseaux électriques publics pour la gestion de la charge: il ne va pas de soi qu'il faille recourir à ces raccordements pour assurer une plus large intégration des sources d'énergie renouvelables dans la production électrique. Dès lors, cette démarche constitue en première analyse une réponse nouvelle à un vieux problème, qui ressortit exclusivement à la gestion énergétique. Comme on l'a expliqué ci-dessus, le défi qui se pose lorsqu'il faut intégrer dans le réseau public des sources d'énergie à caractère fluctuant réside principalement dans leur variabilité saisonnière et journalière. Dès lors que l'on entend garantir que, par principe, la voiture électrique soit toujours prête à l'emploi - et ne s'avère donc pas totalement déchargée au moment précis où l'on souhaitait l'utiliser, l'énergie électrique qui y est stockée ne pourra être utilisée à des fins d'équilibrage du réseau que pour des pics de charge qui soient de durée réduite. Or, ce stockage d'électricité à court terme, limité à

quelques heures ou, au mieux, à une journée, sera d'une utilité quasi négligeable pour intégrer dans le réseau ces sources d'énergie sujettes à des variations.

6 Résumé

Au cours des quinze prochaines années, la voiture électrique n'apportera aucune contribution qui vaille la peine d'être mentionnée à la préservation du climat. Il n'y a pas de sens à tester des flottes de véhicules dont la conception est inadéquate. L'action qu'il convient d'entreprendre consiste plutôt à améliorer, dans des proportions drastiques, l'efficacité énergétique des véhicules conventionnels.

Il est toutefois judicieux d'intensifier les recherches pour perfectionner les systèmes de stockage et, surtout, les rendre plus efficaces au regard de leurs coûts. À terme, à très long terme, l'électricité produite à partir de sources renouvelables pourrait être disponible en quantités telles que la propulsion électrique pourrait devenir une solution de substitution appropriée par rapport aux moteurs à combustion. Dans ce cas, il sera cependant indispensable d'avoir accru considérablement l'efficacité énergétique des véhicules: c'est à cette condition seulement qu'il sera permis d'escompter que les voitures électriques, devenues suffisamment attrayantes et rentables grâce au perfectionnement de leurs batteries, aient quelque chance de percer sur le marché.

Les initiatives que le monde des affaires et les milieux politiques développent actuellement à propos de la voiture électrique portent atteinte à la cause de la préservation du climat, car elles relèguent au second plan les pistes qui seraient vraiment efficaces pour réduire les émissions de gaz à effet de serre imputables au trafic routier, telles que:

- des abaissements rapides des maxima autorisés pour les émissions de CO₂, par exemple pour les amener à un plafond de 80 g/km en 2020,
- une amélioration du rendement des transports publics, grâce à une meilleure utilisation des ressources financières fournies par les pouvoirs publics.

Face à l'argument sans cesse invoqué de la supériorité dont jouirait la propulsion électrique du point de vue du rendement, il convient également de faire observer en

tout état de cause que toute comparaison entre la propulsion par moteur électrique et moteur à combustion n'est possible qu'assortie de réserves notables. Au mieux, la majeure partie des rapports publiés à ce propos sont dépourvus de pertinence technique; au pire, ils pèchent par naïveté¹⁹. Ainsi, il n'est jamais prêté attention à l'infériorité de la voiture électrique du point de vue des performances et de l'autonomie. Dans la comparaison, il faudrait, par exemple, faire entrer en ligne de compte des modèles essence ou diesel qui seraient moins performants en ce qui concerne la durée d'utilisation ou auraient été dotés de petits réservoirs. Un autre point à prendre en considération est que les rares exemplaires actuels de véhicules électriques sont "cousus main" et que leurs composants techniques sont "triés sur le volet"; bien des paramètres seraient différents si elles étaient construites en série. Enfin, toujours dans le cas de la voiture électrique, il faudrait poser que l'ensemble des éléments de confort (chauffage, climatisation, etc.), bénéficient d'une alimentation électrique distincte. C'est ainsi qu'en hiver, l'utilisation du chauffage réduirait nettement l'autonomie de ce type de véhicule.

*

* *

¹⁹

Dans son édition du 2 novembre 2009, le Süddeutsche Zeitung a ainsi publié un compte-rendu enthousiaste d'un essai de quatre semaines qui a été effectué sur une BMW Mini électrique en conditions d'utilisation courante. Il y est notamment mentionné que le véhicule a consommé 250 kWh pour parcourir 860 km. Ces chiffres représentent une moyenne de 29 kWh par 100 km, qui, convertie au niveau actuel des émissions de CO₂ du réseau électrique, donne des rejets de 174 g/km. Sur ce dossier, voir un communiqué de presse de février 2009: "L'Office fédéral des véhicules à moteur confirme que le groupe BMW occupe la première place en matière de réduction de la consommation: en 2008, les émissions de sa flotte de véhicules se montent en moyenne à 158 g/km.

Bibliographie

Agence européenne pour l'environnement (2009) Transport at a crossroads. TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union ("Le transport à la croisée des chemins. Indicateurs Term 2008 de suivi du transport et de l'environnement dans l'Union européenne"), rapport AEE n° 3/2009
<http://www.eea.europa.eu/publications/transport-at-a-crossroads>

Agence internationale de l'énergie (AIE) (éd.) (2008): World Energy Outlook ("Perspectives énergétiques mondiales"), Paris. <http://www.worldenergyoutlook.org/>

Agence européenne pour l'environnement (2008) Energy and environment report 2008 ("Rapport 2008 Énergie et environnement")
http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_6

Agence européenne pour l'environnement (2005) The European environment - State and outlook 2005 ("L'environnement en Europe – État et perspectives 2005")
http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2005_1

Daimler AG (2008): Electric drive. The Age of Electric Mobility Begins ("Propulsion électrique: l'ère de la mobilité électrique commence"). Stuttgart.
www.daimler.com/.../1656483_daimler_inno_2008_booklets_electricdrive_en.pdf

Dietrich, P. (2008): **Die Personenwagen der Zukunft - Ist "Zero-Emission"** beim Auto auch klimaneutral? ("La voiture particulière de l'avenir – La voiture à émissions zéro est-elle également neutre sur le plan climatique?" Conférence au Centre de Compétence Énergie et mobilité (CCEM) Leibstatt.
www.kkl.ch/upload/cms/user/Vortrag_Dr_Dietrich.pdf

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007), IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 ("Quatrième rapport d'évaluation – Changement climatique 2007")
<http://www1.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

Jochen, E. et al. (2008): Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Synthesebericht ("Investissements pour une Allemagne respectueuse du climat. Étude réalisée pour le compte du ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité des réacteurs – rapport de synthèse"), PIK (Institut d'étude des enjeux climatiques, Potsdam). Potsdam <http://www.klimainvest.de/download/synthese.pdf>

Leitinger, C. (2008): Elektrische Mobilität in Österreich: Voraussetzungen und Machbarkeit ("La mobilité électrique en Autriche: conditions et faisabilité"). Conférence prononcée lors des Débats de Vienne sur l'énergie". www.energyagency.at/fileadmin/aea/pdf/.../eg-10-2008-leitinger.pdf

Mohrdeck, C (2009) The Electrification of the Automobile -Technical and economic challenges ("L'électrification de l'automobile – Défis techniques et économiques"). Conférence, LBBW 2009 http://www.daimler.com/Projects/c2c/channel/documents/1719821_LBBW_Presentation_2009_06_10_final_distr_w_o_back_up.pdf

Nitsch, J. (2008): "Leitstudie 2008 -. Weiterentwicklung der Ausbaustrategie Erneuerbare Energien vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas." ("Étude pilote 2008 sur l'évolution de la stratégie de développement pour les énergies renouvelables, dans le contexte des objectifs actuels de l'Allemagne et de l'Europe en matière de préservation du climat"). Étude réalisée pour le compte du ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature et de la sécurité des réacteurs, en collaboration avec le département "Analyse des systèmes et évaluation des techniques" de l'Institut de thermodynamique technique du Centre allemand de recherche aéronautique et spatiale (DLR). Stuttgart. www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/.../leitstudie2008.pdf

Office fédérale de l'environnement (UBA) (2009): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxidemissionen des deutschen Strommix ("Évolution des émissions spécifiques de dioxyde de carbone de la palette allemande de sources de production

électrique"). Dessau. <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>

Office fédéral de statistique (Statistisches Bundesamt)/Union fédérale de l'industrie de l'énergie et de l'eau (BDEW) (2009): Brutto-Stromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland ("Production électrique brute en Allemagne par sources d'énergie. http://www.bdew.de/bdew.nsf/id/DE_Brutto-Stromerzeugung_2007_nach_Energietraegern_in_Deutschland

Pfister, K. (2009): Möglichkeiten und Grenzen der Förderung nachhaltiger Mobilität mit Hilfe elektrischer Fahrzeuge ("Possibilités et limites de l'aide à la mobilité durable au moyen des voitures électriques"). Travail réalisé dans le cadre d'un mastère de l'Université par correspondance de Hagen, sous la direction du Professeur Rudolf Petersen.

Wallentowitz, H.; Gnörich, B. (2005): Entwicklungstrends in der Kfz-Antriebstechnik ("Tendances dans l'évolution des techniques de propulsion des véhicules particuliers"). Conférence prononcée durant la session de la Société allemande pour les véhicules routiers électriques (DGES). Ingolstadt/Aix-la-Chapelle.

Walraven, J. (2008): GM Fuel Cell Vehicle Integration ("La voiture de GM à pile à combustible: intégration". Exposé présenté lors de la conférence du Centre pour les recherches et les technologies énergétiques avancées (AERTC). http://www.aertc.org/conference/AEC_Sessions/Copy_of_Session_1/Track_E-Innovation/Intelligent_Advanced_Transport/8_Justin_Walraven/Justin_Walraven_presentation.pdf