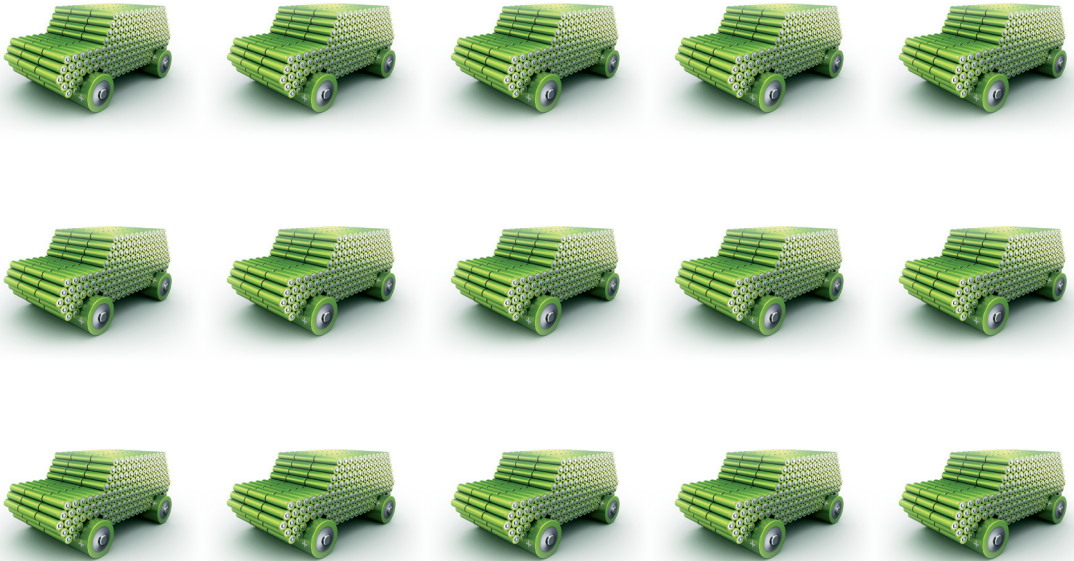




Pierre Courbe

véhicules **électriques** ?

changer de mobilité, pas de voiture !



pepup



dossier

véhicules **électriques** ? **changer de mobilité, pas de voiture !**

véhicules **électriques** ?

changer de mobilité, pas de voiture !

Rédaction

Pierre Courbe

L'auteur remercie toutes les personnes qui lui ont apporté aide et conseils lors de la rédaction de ce dossier. Un merci tout particulier aux membres de la cellule « Mobilité » de la Fédération Inter-Environnement Wallonie et plus spécifiquement encore à **Noé Lecoq** dont l'apport a été précieux.

Relecture, mise en forme finale et coordination

Pierre Titeux

Graphisme

Mathieu Rütimann (www.pepup.be)

Editeur responsable

Christophe Schoune, 98 rue Nanon, 5000 Namur

Imprimé sur papier 100% recyclé et blanchi sans chlore.



sommaire

introduction 08

1 / la société de l'automobile 12

1 // incidences du système de mobilité actuel 14

2 // vers une mobilité soutenable 22

2 / la voiture électrique aujourd'hui 24

1 // comment ça marche ? 26

2 // des points positifs... 30

3 // ...d'autres négatifs 31

3 / voiture électrique & énergie 32

1 // efficacité énergétique 34

2 // demande supplémentaire en électricité 38

3 // greening de la production électrique ? 39

4 // V2G – vehicles to grid 40

5 // alternative aux agrocarburants 41

**4 / voiture électrique
& changements climatiques** 42

5 / le problème central : les batteries 46

1 // une technologie au-dessus du lot 48

2 // des incertitudes lourdes de conséquences 51

3 // électronique portable VS voitures électriques 52

4 // ressources en lithium : estimations variées 54

5 // incidences environnementales 56

6 // le paradoxe du recyclage 58

7 // un coût conséquent 59

6 / voiture électrique : enjeux divers 60

1 // qualité de l'air et bruit : évolution positive 60

2 // autonomie : le verre à moitié plein... 61

3 // taille des véhicules : opportunité à concrétiser ! 62

4 // effet d'aubaine 63

5 // effet rebond 64

6 // effet d'addition 65

7 // effet de substitution 66

8 // investissements massifs 67

**7 / au-delà de la voiture individuelle :
le véhicule électrique**

8 / note aux pouvoirs publics 74

1 // le futur désirable de la mobilité 75

2 // un préalable : étudier le cycle de vie 77

3 // renouveler le parc automobile ? Pas sans analyse coût-bénéfices 79

4 // développement des services publics de transport en commun 80

5 // priorité aux marchés de niches à vocation sociale et flottes captives 81

6 // production et consommation électriques : renforcer le renouvelable 82

7 // la normalisation, un outil précieux 83

8 // législation à revoir pour éviter les effets pervers 84

conclusion 86

liste des acronymes & abréviations 88

bibliographie 90

annexe 96

introduction

Le premier véhicule à motorisation électrique fut construit en 1832 ; il s'agissait d'une sorte de train miniature. La première voiture électrique à batterie rechargeable apparut quant à elle en... 1881, soit quatre à cinq ans avant la première voiture à moteur thermique¹.

Les voitures électriques se développèrent d'abord en France et en Grande-Bretagne avant de gagner les Etats-Unis. Elles connurent leurs heures de gloire aux alentours de 1910 puis divers facteurs vinrent favoriser leur concurrente, la voiture à moteur thermique. Parmi ces facteurs de déclin, citons les développements technologiques (par exemple l'allumage électrique qui permit de s'affranchir de la manivelle) la baisse du prix des carburants ou encore le développement des réseaux routiers incitant aux déplacements de longue distance que les voitures électriques, sans recharge des batteries, ne pouvaient pas couvrir. En 1930, la voiture électrique avait ainsi pratiquement disparu. Mais depuis quelques années, elle jouit d'un regain d'intérêt et parade même régulièrement à la « Une » des magazines spécialisés. Sous ses diverses déclinaisons, elle crée l'événement lors des salons automobiles. 80 ans après sa disgrâce, tiendrait-elle enfin sa revanche ?

¹ Par « voiture thermique », on entend une voiture équipée d'un moteur thermique, c'est-à-dire dans lequel l'énergie est produite sous forme de chaleur, par combustion de carburant (diesel, essence, gaz...), avant d'être transformée en énergie mécanique //

Il n'est guère aisé de répondre à cette question. Tout phénomène de mode comporte en effet une grande part d'irrationalité, portée par de nombreux laudateurs enclins à s'enthousiasmer sans faire appel à leur esprit critique. C'est pourquoi nous allons dès lors tenter de nous livrer dans ce dossier à ce périlleux mais nécessaire exercice d'analyse (se voulant) objective.

Ne boudons pas notre plaisir : le véhicule électrique présente indéniablement plusieurs avantages non négligeables. Pas d'émissions locales de polluants (oxydes d'azote, particules fines et *tutti quanti*) qui affectent la santé humaine. Pas de bruit aux vitesses faibles. Une réduction non négligeable des émissions de gaz à effet de serre. Une compatibilité avec toutes les sources d'énergie primaire. Enfin, la motorisation électrique ne se limite pas aux seules voitures. Elle équipe déjà de nombreux véhicules de transport en commun sans stockage d'énergie (trains, métros, trams, trolleys) et elle se développe par ailleurs pour les véhicules très légers, scooters et vélos, ceux-ci exigeant des besoins en matière de stockage d'énergie fortement réduits étant donné leur faible masse et l'autonomie limitée qu'ils doivent offrir (quelques dizaines de kilomètres). En cela, la motorisation électrique peut participer à une redéfinition de notre modèle de mobilité.

Mais il nous faut également garder la tête froide : la voiture électrique n'apporte aucune réponse à la majeure partie des incidences de notre système de mobilité (accidents, encombrement de l'espace public, sédentarisation, épuisement de ressources naturelles, déchets, impacts des infrastructures sur la biodiversité, iniquité sociale, congestion...). Elle s'inscrit dans une logique de pérennisation du système de mobilité actuel, centré sur la voiture individuelle : l'application aux véhicules légers (vélos à assistance électrique et autres) n'est que très marginalement investiguée. De plus, tout en apportant un élément de réponse à la raréfaction prochaine des réserves de pétrole, elle engendre une nouvelle forme de dépendance à d'autres matières premières. Au premier rang de ces nouvelles valeurs (boursières) sûres, le lithium, actuellement indispensable pour produire des batteries susceptibles de positionner la voiture électrique en concurrente crédible à la voiture thermique. L'exploitation à grande échelle des réserves de lithium pose de nombreuses questions (enjeux géostratégiques, impacts sur les populations locales, impacts sur les écosystèmes) actuellement négligées.

Dans ces conditions, pourquoi cet engouement pour la voiture électrique ?

Après l'essai avorté des agrocarburants, qui laissent maintenant apparaître les étroites limites de leurs mérites et toute l'étendue de leurs incidences négatives, la motorisation électrique est la meilleure – peut-être parce que la seule – option offerte à l'industrie automobile de redorer (ou plutôt « reverdir ») son image. De plus, c'est actuellement, dans ses différentes déclinaisons (électrique pure ou hybride), la seule alternative technique crédible à la voiture thermique. Et donc la seule voie offerte à la pérennisation de la voiture individuelle.

C'est précisément en cela qu'il convient de se méfier d'une vision trop idéalisée de la voiture électrique: elle entretient l'illusion que notre modèle de mobilité est pérenne. Que nous pourrions, éternellement, couvrir nos 15.000 km annuels. Par assimilation progressive de la fausse équation « voiture électrique = voiture propre », elle nous permet de fermer pudiquement les yeux sur les nombreuses incidences – parfois dramatiques, comme les 40.000 morts annuelles sur les routes européennes – de nos habitudes de mobilité. Elle nous évite une profonde remise en question.

Approche systémique et analyse des aspects techniques ont été les deux fils conducteurs dans la rédaction du présent dossier. Nous espérons que le lecteur y trouvera les éléments de réponse à toutes les questions qui ne sont que trop rarement posées...

1 / la société de l'automobile

Au cours de la seconde moitié du XX^{ème} siècle, les pratiques de mobilité se sont profondément modifiées dans les sociétés occidentales. Les transports routiers et aériens ont connu des taux de croissance impressionnants. En 1970, 29,4 milliards de kilomètres étaient parcourus sur les routes belges contre 97,7 milliards en 2005, soit une augmentation de 232% sur 38 ans. On parcourt actuellement chaque jour sur notre réseau routier l'équivalent de près de 6.690 fois le tour de la Terre – dont 5.190 pour les seules voitures!

Entre 1970 et 2008, la longueur du réseau routier belge a augmenté de 63% alors que le kilométrage de voies ferrées diminuait de 20% et que le nombre de gares et points d'arrêts connaissait une chute vertigineuse de 46%! Le taux de motorisation de la population a suivi la même évolution que les infrastructures routières et continue d'augmenter. En 2006, il y avait en Belgique 472 voitures pour 1000 habitants, 479 en 2008 et 486 en 2010; le pays comptait très exactement 5.276.283 voitures (immatriculations belges) au 1^{er} août 2010.

Ces évolutions ont rendu possible – et ont été accélérées par... – l'éparpillement de l'habitat et des lieux d'activités sur tout le territoire et non plus dans les seules villes et agglomérations. Ces changements structurels ont été accompagnés d'une évolution des mentalités et des modes de vie, de plus en plus individualistes. Pour effectuer les déplacements toujours plus nombreux et plus complexes induits par ces évolutions, la voiture s'est peu à peu imposée comme la solution la plus simple, voire la seule.

Nous vivons aujourd'hui dans une « société de l'automobile »; la voiture fait partie intégrante de notre vie. Les Wallons utilisent ainsi la voiture pour 93% de leurs déplacements d'une distance de plus de 25 km mais aussi pour 22% de leurs déplacements inférieurs à... 1 kilomètre!

1 / 1 // incidences du système de mobilité actuel

Les incidences du système de transport centré sur l'automobile ne se réduisent pas aux seules émissions de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone – CO₂ – principalement) ou de polluants locaux (notamment les particules fines et oxydes d'azote qui affectent grandement la santé humaine) générées durant l'utilisation des véhicules. Dans les faits, les incidences sont beaucoup plus nombreuses et multidimensionnelles : elles peuvent se manifester au niveau local comme au niveau global, sur les plans économique, social et environnemental et durant les différentes étapes de la durée de vie des véhicules et des infrastructures.

Sans prétendre à l'exhaustivité, les paragraphes suivants tentent de présenter succinctement ces différentes incidences dans leurs multiples dimensions.

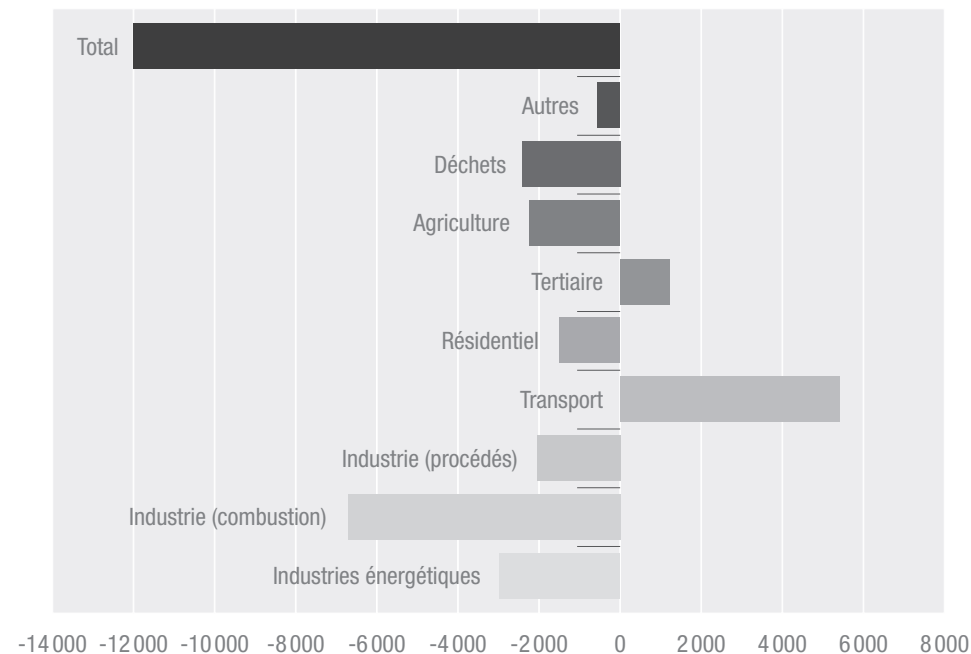
1 / 1 // 1 /// gaz à effet de serre

En 1990, le secteur des transports était responsable de 17,1% des émissions totales de gaz à effet de serre de la Belgique; en 2008, ce pourcentage est monté à 23,5%. Cette évolution s'explique par la « remarquable » (mais trop peu remarquée...) croissance quantitative des émissions du transport qui sont passées de 20,1 à 27,4 millions de tonnes équivalent CO₂ sur cette période, soit une augmentation de + 36,1%. En chiffres ronds, ces émissions sont à 95% imputables aux transports par route (voiture et camion). En Wallonie, le transport de personnes est responsable de 62,4% de la consommation énergétique – et donc des émissions de gaz à effet de serre – des transports routiers : 55,1% pour les voitures et 7,3% pour les véhicules de transport en commun.

Les transports, plus encore que le chauffage des bâtiments (résidentiel et tertiaire) connaissent donc une évolution préoccupante (**voir figure 1**), mettant à mal les efforts de réduction d'émissions de gaz à effet de serre consentis par les autres secteurs (industrie, agriculture, transformation énergétique, déchets).

Figure 1 : Emissions de gaz à effet de serre en Belgique : impacts des différents secteurs sur la tendance globale 1990-2007 (en kton CO₂-éq.)

(source : 5^{ème} Communication nationale sur les changements climatiques)



Or, le défi majeur que constitue la lutte contre les changements climatiques appelle des solutions radicales. Dans le cadre de l'accord de Copenhague, les engagements européens sont de réduire les émissions totales de gaz à effet de serre de 20% à l'horizon 2020 par rapport à l'année de référence 1990 (et de 30% si d'autres nations industrialisées s'engagent de façon comparable). La communauté scientifique, via le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), appelle les gouvernements des pays développés à faire plus encore : une réduction de 25 à 40% des émissions d'ici 2020 est indispensable pour éviter toute perturbation climatique majeure mettant en jeu des centaines de millions de vies humaines à l'échelle planétaire. De telles réductions ne pourront être réalisées que par le biais d'une profonde modification de nos modes de production et de consommation. Il est évident que dans ce contexte, nos habitudes de mobilité, aux très (trop) nombreux impacts négatifs, ne pourront perdurer... Il est donc indispensable de mettre en œuvre sans délai les indispensables politiques de transition car la politique de l'autruche ne paie jamais.

1 / 1 // 2 /// dépendance énergétique

La facture pétrolière européenne journalière a atteint un milliard d'€ au printemps 2008 ; le pétrole fournit 98% de l'énergie consommée par le secteur des transports, lequel représente environ 25% de la consommation finale d'énergie dans les pays développés.

Par ailleurs, quels que soient la source et le vecteur d'énergie sollicités, la quantité totale d'énergie consommée par le secteur des transports est telle que, pour un pays comme la Belgique, le maintien du degré de mobilité actuel implique l'importation massive d'énergie – avec les problèmes que cela suppose dans une situation de déplétion présente ou prochaine des principales sources d'énergie primaire actuelles.

1 / 1 // 3 /// déplétion des ressources naturelles

Avec ses 50 millions de véhicules fabriqués annuellement, le marché automobile est un grand consommateur de ressources dont certaines sont en voie d'épuisement : le pétrole et le cuivre, bien sûr, mais aussi d'autres matériaux (dont certains éléments du groupe des terres rares) requis par les nouvelles technologies : le lanthane pour les batteries au nickel, le néodyme, le dysprosium et le samarium pour les aimants de certains moteurs électriques, etc. La Chine, qui a produit 97% des terres rares vendues en 2009, a d'ailleurs annoncé son intention de réduire ses quotas d'exportation².

1 / 1 // 4 /// déchets

Durant les différentes étapes de leur durée de vie, les véhicules rejettent nombre de matières polluantes, notamment des métaux lourds, des huiles minérales et des déchets ultimes. Au-delà des fuites et rejets locaux induits par les véhicules durant leur utilisation, d'importants mouvements « d'exportation de la pollution » sont observés. Ainsi, actuellement, seuls 30% des véhicules qui, atteints par la « limite d'âge », sortent du parc belge, entrent dans les filières de recyclage. Le solde quitte le territoire national pour d'autres pays (d'Afrique principalement) où les filières de recyclage ne sont pas encore développées.

1 / 1 // 5 /// impacts des infrastructures sur les milieux naturels

« Les zones urbanisées étant généralement peu favorables à la faune et à la flore, le potentiel d'accueil de la vie sauvage a tendance à diminuer en Région wallonne. La fragmentation du territoire accentuée par le caractère diffus de l'urbanisation peut conduire à l'isolement de populations, éventuellement suivi de leur déclin par manque de croisement génétique ou parce que la taille critique de survie de la population n'est plus atteinte »³. La Belgique et la Région wallonne sont particulièrement touchées par ce phénomène, comme en atteste le **tableau 1**.

² AFP, 2010 //

³ Cellule Etat de l'Environnement wallon, 2003 //

Tableau 1 : Densité d'infrastructures routières en Wallonie, en Belgique et en Hollande

| | Wallonie | Belgique | Hollande |
|---|----------|----------|----------|
| Densité de population (hab/km ²) | 202 | 347 | 394 |
| Densité de routes (km/100 km ²) | 479 | 503 | 326 |
| Routes rapportées à la population (km/1000 hab) | 24 | 14,5 | 8,3 |

On distingue généralement quatre types d'effets des infrastructures routières sur le milieu naturel :

1. effet de substitution : la construction d'une infrastructure signifie une perte de la superficie des espaces naturels sur toute la largeur de l'emprise ;
2. effet de perturbation des milieux : pollutions gazeuses, rejets liquides, bruit, vibrations, éclairage ; selon leur intensité et leur forme, ces perturbations peuvent entraîner des disparitions d'espèces (animales ou végétales) sensibles sur une certaine distance par rapport à la route ;
3. effet barrière : la route peut se trouver entre des biotopes qui remplissent des fonctions bien précises (exemple : entre zones de reproduction et d'hivernage des amphibiens) ; un biotope fragmenté par la route peut devenir trop petit pour héberger une population viable de certaines espèces ;
4. mortalité due au trafic : la réduction de population par perte directe d'individus risque, dans certains cas, de menacer à terme la survie de la population.

Outre ces quatre types d'effets, il importe de prendre aussi en compte les incidences, souvent non négligeables, liées au chantier.

1 / 1 // 6 /// polluants locaux

Les polluants locaux sont ceux qui affectent les milieux de vie directement voisins de la source des émissions. Il s'agit du monoxyde de carbone (CO), des composés organiques volatils (COV), des oxydes d'azote (NO_x), des particules fines (PM) et du bruit. Ces polluants impactent fortement la santé humaine. On estime à environ 2.500 le nombre annuel de décès prématurés imputables aux particules fines émises par les transports en Belgique, soit 2,5 fois plus que les accidents de la route. Les oxydes d'azote participent par ailleurs aux phénomènes des pluies acides (par oxydation dans l'air en acide nitrique – HNO₃) et d'eutrophisation (par apport d'azote dans les milieux aquatiques). Les coûts sociaux induits par le bruit routier sont quant à eux estimés à 0,4% du PIB au niveau européen.

1 / 1 // 7 /// sécurité et sédentarité

En Belgique, les accidents de la route ont causé, en 2008, 944 décès (dont 33% de moins de 25 ans), 6.782 blessés graves et 57.654 blessés légers recensés. Si la sécurité des occupants des véhicules s'est fortement améliorée ces 20 dernières années, il n'en va pas de même des usagers faibles (piétons, cyclistes) heurtés par les véhicules qui représentent 20% des tués; par ailleurs, les services d'urgences des hôpitaux signalent une augmentation du nombre de lésions internes chez les accidentés de la route.

Le recours systématique à la voiture crée un problème paradoxal dans une société de plus en plus mobile: celui de la sédentarisation ou, plus exactement, du manque d'activités physiques. Il s'agit de l'une des deux causes principales (l'autre résidant dans les habitudes alimentaires) de l'épidémie d'obésité qui touche les pays développés.

Le manque d'autonomie des enfants (génération «banquette arrière») peut, outre les aspects liés au surpoids, entraîner des problèmes de sociabilisation et rendre plus difficile, à l'âge adulte, l'utilisation des modes alternatifs à la voiture⁴.

1 / 1 // 8 /// espace public et patrimoine bâti

L'espace public est de nos jours largement dévolu aux véhicules motorisés: on cite généralement le chiffre de 70% en milieu urbain. Cette confiscation de l'espace public se fait au détriment d'autres fonctions et provoque une charge sur la convivialité: autrefois lieu de rencontre au sein duquel les piétons se mouvaient librement, l'espace public est aujourd'hui majoritairement dévolu à la circulation et au parking des véhicules.

La circulation automobile provoque par ailleurs d'importantes dégradations du patrimoine bâti, du fait des salissures et attaques de composés acides présents dans les rejets gazeux.

1 / 1 // 9 /// inégalités sociales

Le système automobile est profondément inégalitaire, tant en matière d'accès à la mobilité que d'exposition aux nuisances. Les personnes ayant les revenus les plus modestes ont moins facilement accès à l'automobile et ce sont également celles qui sont le plus soumises à ses incidences négatives du fait de la relation entre prix du logement et exposition au bruit routier.

Cette inégalité d'accès à l'automobile génère une inégalité d'accès au marché du travail: le cas n'est pas rare d'un demandeur d'emploi se voyant refuser l'accès à une fonction pour laquelle la possession d'un véhicule est requise – véhicule que seul un salaire lui permettrait d'acquiescer...

4 Walckiers, 2010 //

1 / 1 // 10 /// coûts externes

La collectivité doit prendre en charge une série de coûts non payés par les automobilistes. Ces coûts sont associés aux impacts négatifs des véhicules (bruit, accidents, pollution) ou à la mise à disposition des infrastructures; ils équivalent à environ 7,3% du PIB au niveau européen. Par ailleurs, avec la congestion des réseaux, le temps de production perdu dans les embouteillages représente quelque 0,7% du PIB au niveau européen⁵.

La désurbanisation induite par le système automobile pèse également lourdement sur les budgets publics. L'exode urbain de ces dernières décennies a généré une série de dépenses «cachées» associées aux infrastructures (voirie, réseaux de distribution d'eau alimentaire et d'électricité...), aux superstructures (écoles, hôpitaux, piscines, crèches...) et à la desserte par des agents spécialisés (distribution du courrier, collecte des déchets...) ⁶.

1 / 1 // 11 /// incidences et cycles de vie

Les incidences listées ci-dessus se manifestent tantôt à telle étape de la vie des véhicules, tantôt à telle étape de la vie des infrastructures de transport. Nous allons nous attacher à classer les incidences environnementales en fonction de ces cycles de vie.

Construction du véhicule et des pièces de rechange (y compris en amont, avec l'extraction des matières premières, etc):

- consommation d'énergie: la fabrication de voitures neuves en Europe (EU25) consomme annuellement 23,3 millions de tonnes équivalent pétrole (tep), soit l'équivalent la consommation finale d'énergie en Wallonie⁷;
- changements climatiques: la construction d'un véhicule génère environ 5 tCO₂; globalement, la fabrication de voitures neuves en Europe (EU25) est responsable de l'émission de 65 millions tCO₂, soit 2,4 fois les émissions du secteur des transports en Belgique;
- particules fines: la fabrication d'un véhicule rejette 0,9 kg de particules fines PM_{2,5}, soit la quantité émise en roulant 180.000 km avec une voiture respectant les normes Euro 5;
- déplétion des ressources naturelles: pétrole, cuivre, terres rares...

5 INFRAS/IWW, 2004 //

6 CPDT, 2000 //

7 JRC [1], 2008 //

Construction des infrastructures (au sens large: routes, stations service...):

- consommation d'énergie (pétrole principalement) et déchets ultimes associés à la construction, à l'entretien et à la fin de vie des routes, des stations-services...;
- morcellement des espaces naturels par les infrastructures et effet barrière pour les espèces animales;
- effet de substitution (d'un milieu naturel par un milieu artificiel);
- effet de perturbation des milieux (écoulements, bruit, pollution lumineuse...).

Utilisation du véhicule:

- changements climatiques : en Belgique, une voiture émet en moyenne 2,7 tCO₂ par an;
- émission de polluants locaux affectant la santé (oxydes d'azote, particules fines...);
- bruit généré par le trafic : 40% de la population européenne (EU15) est exposée à un bruit routier de 55dB(A) durant la journée et 20% à des niveaux excédents les 65dB(A); durant la nuit, plus de 30% de la population est exposée à une intensité de plus de 55 dB(A)⁸.

Mise à disposition de l'énergie:

- perturbation des milieux naturels et pollutions associées à l'extraction, ce problème devenant de plus en plus prégnant avec le déclin des réserves pétrolières et l'exploitation de réserves non conventionnelles : forages en eaux profondes (Golfe du Mexique, par exemple), schistes bitumineux et sables asphaltiques (Alberta, Canada, par exemple);
- perturbation des milieux naturels et émissions de gaz à effet de serre associées au changement d'affectation des sols pour la culture de plantes destinées à la fabrication d'agocarburants;
- émissions de gaz à effet de serre et de polluants locaux induites par les étapes de transformation et de transport de l'énergie.

⁸ Xhonneux, 2010 //

Fin de vie du véhicule:

- déchets ultimes: environ 15% (en masse) des 130.000 voitures déclarées annuellement hors d'usage en Belgique sont mis en décharge, le reste étant réutilisé, recyclé ou converti en énergie;
- par ailleurs, des 320.000 voitures qui quittent le territoire national chaque année, fort peu entreront dans une filière de recyclage en fin de vie – mais beaucoup termineront leur carrière en décharge dans un pays du sud, ceci bien souvent sans prise en charge des déchets toxiques.

1 / 2 // vers une mobilité soutenable

Selon l'OCDE, un système de mobilité durable est « *un système dans lequel les transports ne compromettent pas la santé publique ni les écosystèmes et répondent aux besoins d'accès dans des conditions compatibles avec 1. une consommation des ressources renouvelables à un rythme inférieur à leur vitesse de régénération et 2. une consommation de ressources non-renouvelables à un rythme inférieur à celui de développement des produits renouvelables de remplacement.* »⁹

Rencontrer cette définition et porter remède aux incidences du système automobile requiert **une approche systémique**. Le développement de techniques novatrices en matière de motorisation des véhicules n'a de sens que dans le cadre d'une telle approche.

Réduire les incidences de notre système de transports, l'orienter vers plus de durabilité implique ainsi d'activer trois principaux axes qui sont, par ordre de priorité :

- la réduction de la demande ;
- le transfert modal ;
- l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution des pollutions spécifiques des véhicules.

Il est de la responsabilité des citoyens de poser des choix individuels responsables. De même, il est de la responsabilité des pouvoirs législatif et exécutif de créer un cadre légal performant pour définir les grands axes du système de mobilité soutenable du futur et guider le citoyen dans ses choix. Les outils dont disposent pour ce faire les pouvoirs publics relèvent de quatre catégories :

- la planification (aménagement du territoire, investissements en transport en commun, soutiens à la recherche-développement...);
- les normes et réglementations (normes de produits, code de la route...);
- la fiscalité (taxe de mise en circulation, taxe de circulation, accises, Eurovignette...);
- l'information et la sensibilisation.

9 OCDE, 2002 //

En matière de motorisation électrique de véhicules particuliers, les pouvoirs publics devront mobiliser les quatre catégories d'outils tout en gardant à l'esprit que le véhicule électrique relève de la troisième et dernière priorité en matière de mobilité durable et que le principal problème en matière d'efficacité énergétique des véhicules automobiles actuels réside dans un rapport « poids passager(s)/poids véhicule » médiocre, situation aggravée par la surenchère en matière de performance dynamiques des véhicules. En effet, les véhicules plus rapides, plus puissants, sont également plus lourds pour offrir des conditions de confort et de sécurité aux vitesses et accélérations élevées (même si celles-ci ne peuvent pas être atteintes sauf à enfreindre le code de la route). A contre-courant de cette évolution, la voie de la modération et de l'allègement est à privilégier.

Le défi est de taille : il est toujours difficile de sortir d'un schéma de pensée pour proposer une évolution ou un concept entièrement neuf.

2 / la voiture électrique aujourd'hui

Le premier véhicule automobile à motorisation électrique (en fait, un train miniature) fut construit en 1832. En 1859, la batterie rechargeable au plomb était mise au point. Perfectionnée, elle allait permettre à la première véritable voiture électrique de voir le jour en 1881, soit quatre à cinq années plus tôt que la première voiture à moteur thermique. Les voitures électriques se développèrent alors rapidement, d'abord en France et en Grande-Bretagne puis aux Etats-Unis : en 1897, tous les taxis de New-York roulaient à l'électricité.

Les véhicules électriques connurent leurs heures de gloire aux alentours de 1910. Mais divers facteurs vinrent favoriser leur concurrent, le véhicule à moteur thermique :

- le développement des réseaux routiers, incitant aux déplacements de longues distances, que ne pouvaient pas couvrir les véhicules électriques sans recharge des batteries ;
- les développements technologiques en matière de motorisation thermique, notamment l'allumage électrique qui permit de s'affranchir de la manivelle ;
- la production de masse des véhicules thermiques sur le modèle d'Henry Ford, avec à la clé un coût d'achat bien en-deçà de celui des véhicules électriques ;
- la baisse du prix des carburants consécutive à la découverte de pétrole au Texas.

Il résulta de tout cela qu'en 1930, la voiture électrique avait pratiquement disparu.

Elle connut un regain d'intérêt dans les années 1970, avec les flambées des prix des carburants induites par les chocs pétroliers. Les progrès attendus en matière de batteries ne furent cependant pas au rendez-vous. Il fallut attendre le début des années 1990, et notamment les lois californiennes sur la pollution de l'air, pour que les constructeurs s'intéressent à nouveau au véhicule électrique. Ils ne purent toutefois réduire les coûts de production à un niveau comparable à celui des véhicules thermiques.

2 / 1 // comment ça marche ?

Outre le coût des véhicules, c'est le délicat problème du stockage de l'énergie qui a permis à la filière thermique de supplanter les autres motorisations automobiles. Le réservoir d'énergie d'un véhicule automobile doit en effet répondre à de multiples contraintes pour satisfaire aux besoins – ou plus exactement aux habitudes – de mobilité :

- les capacités du réservoir doivent être telles qu'une certaine autonomie est garantie au véhicule (de l'ordre de 500 km et plus pour les véhicules à moteur thermique) ;
- la masse, l'encombrement et le coût du réservoir d'énergie doivent s'approcher de l'optimum défini par les réservoirs à hydrocarbures liquides ;
- la sécurité doit être assurée tant au moment du remplissage que durant toute la durée du stockage ;
- le temps de remplissage du réservoir d'énergie doit être suffisamment court (de l'ordre de 5 minutes pour du carburant liquide).

Aucune technologie concurrente n'a permis, jusqu'ici, d'égaliser les performances des véhicules à moteur à combustion interne en matière de stockage de l'énergie (**tableau 2**).

Tableau 2 : Caractéristiques de différents vecteurs de stockage de l'énergie

| | Essence | Diesel | Electricité | GNV | GPL | H ₂ gaz | H ₂ liquide |
|---------------------------------|----------|----------|--------------------|------------|-------------|--------------------|------------------------|
| Etat | Liquide | Liquide | Electro-chimique | Gaz | Liquide | Gaz | Liquide |
| Température (°C) | Ambiante | Ambiante | de ambiante à 300° | Ambiante | Ambiante | Ambiante | - 253°C |
| Pression de stockage | Ambiante | Ambiante | Ambiante | > 200 bars | 5 à 25 bars | 700 bars | 5 bars |
| Energie massique en Wh / Kg | 11.900 | 11.800 | 30 - 200 | 2.200 | 7 080 | 1.200 | 500 - 1.000 |
| Energie volumique en Wh / litre | 8.900 | 9.900 | 70 - 300 | 2.500 | 4.300 | 450 | 1.800 |
| Durée de remplissage | 5 mn | 5 mn | 10 mn à 8h | 5 mn | 5 mn | 5 mn | 5 mn |

Confrontée aux défis énergétique et climatique, l'industrie automobile a, ces deux dernières décennies, investi d'impressionnants budgets de recherche dans le développement de solutions de substitution aux carburants pétroliers.

Une première approche consiste à remplacer, en tout ou en partie, l'essence ou le diesel par d'autres carburants pouvant alimenter un moteur thermique : gaz naturel (GN ou GNV pour gaz naturel de ville), gaz de pétrole liquéfié (GPL), agrocarburants (éthanol et agrodiesel), hydrogène.

GN et GPL, issus de ressources fossiles, n'offrent guère de solution aux problèmes géopolitiques associés à l'approvisionnement en hydrocarbures ni aux problèmes de déplétion des ressources. Ils n'offrent donc tout au plus qu'une réponse partielle et temporaire aux défis de l'industrie. Quant aux agrocarburants, les craintes exprimées au sujet de leurs impacts environnementaux, sociaux et économiques se sont rapidement confirmées et ils apparaissent aujourd'hui créer plus de problèmes qu'ils n'apportent de solutions.

Une deuxième approche consiste à substituer au moteur thermique (ou à lui adjoindre) un autre organe propulseur : moteur à air comprimé ou moteur électrique. La consommation d'énergie associée à la compression de l'air, la difficulté de son stockage à bord du véhicule et les rendements modestes des moteurs à air comprimé ne permettent pas d'envisager l'application de cette technologie à grande échelle pour les véhicules particuliers. Restent donc en lice les moteurs électriques.

Le terme « véhicule électrique », entendu au sens générique, recouvre de nombreuses technologies concurrentes.

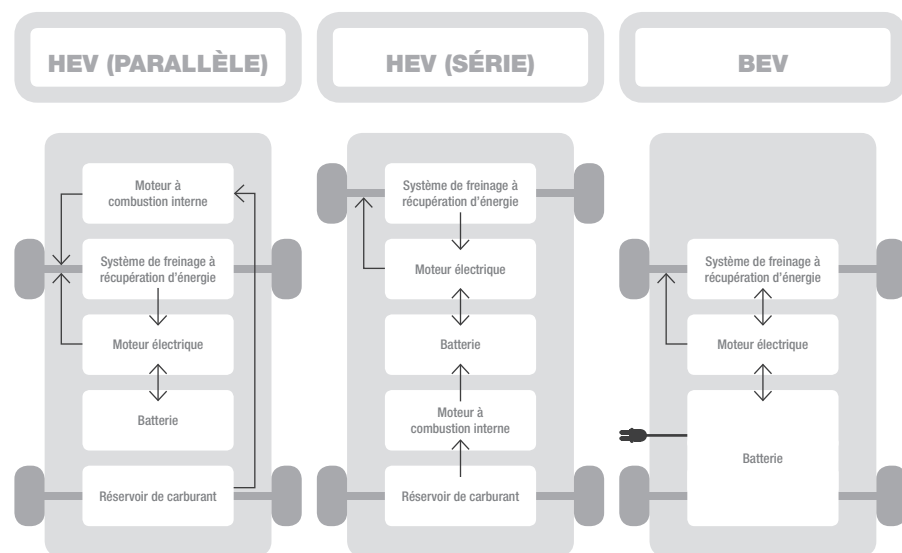
Une première différenciation apparaît au niveau du stockage de l'énergie à bord du véhicule, lequel peut se faire dans des batteries (stockage électrochimique), dans un réservoir classique (carburant alimentant un moteur thermique, entraînant l'essieu et/ou un alternateur qui produira de l'électricité) ou dans un réservoir d'hydrogène (celui-ci alimentant alors une pile à combustible qui produira de l'électricité). Dans certains cas, l'énergie n'est pas stockée dans le véhicule mais prélevée sur un réseau de distribution au cours des déplacements. De nombreux véhicules de transport en commun fonctionnent sur ce principe : trains, trams, trolleys, métros.

Une seconde différenciation peut être établie entre véhicules combinant moteur thermique et moteur électrique (véhicules hybrides ou HEV pour *hybrid electric vehicles*) et véhicules dont la propulsion n'est assurée que par un (ou plusieurs) moteur électrique (véhicules électriques purs ou BEV pour *battery electric vehicles*), comme schématisé à la **figure 2**.

Lorsque le moteur thermique entraîne un alternateur qui produit l'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur électrique, on parle d'hybride série (les deux moteurs sont montés en série). Lorsque les deux moteurs peuvent entraîner l'un ou l'autre ou l'un et l'autre l'essieu, on parle d'hybride parallèle (les deux moteurs sont montés en parallèle). Les véhicules électriques purs peuvent être équipés soit d'un moteur unique engrenant sur un système de transmissions mécanique entraînant l'essieu, soit de deux ou quatre moteurs entraînant directement les roues¹⁰.

Les véhicules hybrides peuvent soit être pourvus de batteries assez importantes (5 à 10 kWh) rechargeables sur le réseau électrique (on parle alors de PHEV pour *plug-in hybrid electric vehicles*) et offrir une autonomie de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres en mode électrique pur, soit être pourvus de batteries plus modestes (1 à 2 kWh) rechargées par le moteur thermique et/ou la récupération d'énergie à la décélération et au freinage.

Figure 2 : Schéma de fonctionnement des véhicules électrique pur (BEV), hybride parallèle (HEV parallèle) et hybride série (HEV série)



10 Michelin, 2008 //

Les batteries Ni-MH sont actuellement le standard pour équiper les voitures hybrides (moteur à combustion + moteur électrique). En effet, malgré de moins bonnes performances que celles des batteries à base de lithium (voir chapitre 5.1.), elles gardent l'avantage de bien supporter de forts courants de charge et de décharge et sont beaucoup plus sûres en cas de surchauffe. La Toyota Prius et la Honda Civic IMA, par exemple, sont toutes deux équipées d'une batterie Panasonic (Matsushita) Ni-MH de 1,5 kWh, de 39 kg pour la première et de 28 kg pour la seconde. Ces batteries sont prévues pour durer toute la durée de vie du véhicule (garantie 8 ans)¹¹.

La motorisation électrique ne se limite pas aux seules voitures. D'une part, comme dit ci-dessus, elle équipe déjà de nombreux véhicules de transport en commun sans stockage d'énergie. D'autre part, elle se développe pour les véhicules très légers : scooters et vélos. Dans ce cas, les besoins en matière de stockage d'énergie sont fortement réduits étant donné la faible masse des véhicules et l'autonomie limitée qu'ils doivent offrir (quelques dizaines de kilomètres).

Les pays européens où les véhicules électriques ont le mieux « percé » sont la France, l'Italie, l'Allemagne et la Suisse. On y trouvait respectivement 8.298, 6.352, 2.340 et 892 voitures électriques pures sur les routes en 2004 (alors qu'il n'y en avait que 165 en Belgique) selon un relevé de l'AVERE¹². Il n'est guère étonnant de retrouver aux quatre premières places, trois des principaux producteurs d'automobiles européens et la Suisse, dont les capacités en matière d'hydroélectricité lui permettent d'envisager sereinement le développement à grande échelle des véhicules électriques comme réponse aux défis énergétique et climatique.

11 Pluchet, 2010 //

12 AVERE [2], 2005 //

2 / 2 // des points positifs...

La voiture électrique telle que les principaux constructeurs automobiles la proposent aujourd'hui présente plusieurs avantages par rapport à sa concurrente thermique :

- la motorisation électrique s'accommode de toute source d'énergie primaire, dont les énergies renouvelables ;
- pour une même énergie dispensée à l'essieu, elle présente des émissions de CO₂ réduites de 30% (40%) par rapport à un véhicule diesel (essence), ceci en prenant en compte le mix de production d'électricité européen (voir chapitres 3.1. et 4) ;
- elle n'émet pas de polluants locaux à l'utilisation, hors les poussières émises par les divers frottements (pneus, plaquettes de freins, ...);
- elle n'émet pas de pollution sonore aux basses vitesses (c'est-à-dire en-dessous de 50 km/h environ : au-delà, les bruits de roulement se manifestent).

Cette solution offre donc une solution partielle à deux importantes incidences du système de mobilité actuel : les polluants locaux et, dans une moindre mesure, les émissions de CO₂.

2 / 3 // ...d'autres négatifs

Les réserves et les questionnements quant au développement à grande échelle des voitures électriques se manifestent sur les plans suivants :

- un (quasi) statu-quo au niveau de l'efficacité énergétique (de l'ordre de 20% du puits à la roue, soit sur l'entièreté de la filière, de l'extraction de l'énergie primaire à la restitution à l'essieu – voir chapitre 3.1.);
- un accroissement de la demande en énergie électrique qui, en l'absence de garde-fous, pourrait s'avérer favorable au secteur nucléaire ;
- une attractivité renforcée des déplacements automobiles en milieu urbain, les voitures électriques se prêtant particulièrement bien aux courtes distances pour lesquelles leurs performances sont comparables à celles de leurs concurrentes thermiques ;
- une augmentation du nombre de véhicules automobiles (la voiture électrique pour les petits déplacements et la voiture thermique pour les longs trajets), ce qui pose problème tant au niveau de la pollution associée à la fabrication des véhicules qu'au niveau de l'encombrement de l'espace public et de la congestion ;
- des filières de démantèlement des batteries qui n'offrent pas toujours de sécurité environnementale en ce qui concerne les déchets toxiques ;
- le risque d'ignorer le principe de précaution. Les études scientifiques sont en train de faire la démonstration de l'erreur que constitua le développement des agrocarburants : les émissions associées aux changements d'affectations des sols rendent la grande majorité de ces carburants plus nocifs pour le climat que les dérivés du pétrole¹³. De plus, les problèmes sociaux associés à leur production et les questionnements en termes de mise en danger de la souveraineté alimentaire sont plus qu'inquiétants. Le même effet est donc à craindre : ne va-t-on pas découvrir, demain, que la production à grande échelle des batteries pour les véhicules électriques induit, elle aussi, son cortège d'effets pervers ? Il semble sage d'attendre de clarifier ce point avant de se lancer dans la promotion des voitures électriques ;
- un développement qui donne l'illusion qu'il est possible de pérenniser le système automobile mais laisse sans réponse la plupart de ses nombreuses incidences.

13 Birdlife International, EEB and T&E, 2010 //

3 / voiture électrique & énergie

Les chiffres de rendement énergétique des véhicules varient grandement en fonction des auteurs et des hypothèses faites sur les différents stades de transformation et de transmission de l'énergie. Ainsi, en matière de production d'électricité, le rendement dépend fortement du mix énergétique¹⁴ du pays ou groupe de pays considéré. Autre exemple, les rendements moteurs des véhicules thermiques les plus performants sont supérieurs aux rendements moyens des parcs de véhicules actuels, lesquels sont généralement utilisés comme référence pour les comparaisons des performances.

Par ailleurs, le rendement des batteries des véhicules électriques est souvent pris égal à un optimum qui a peu de rapport avec les rendements mesurés en conditions réelles. Ou encore, la motorisation électrique permet (mais ce n'est pas toujours le cas) de s'affranchir des pertes dans les organes de transmission mécanique dès lors que le ou les moteurs engrènent directement sur l'essieu ou les essieux moteur(s), ce qui est rarement intégré dans les bilans énergétiques.

Selon l'association européenne pour les véhicules électriques à batterie, le rendement total de la filière énergétique, de l'énergie primaire à l'énergie délivrée aux roues du vé-

¹⁴ Le mix énergétique correspond à la répartition des filières de production de l'énergie électrique à partir des différentes énergies primaires. Le rendement et les émissions de CO₂ sont fortement dépendants du mix (pourcentage de centrales au charbon, au gaz, de centrales nucléaires, d'énergies renouvelables...) //

hicule¹⁵, est compris entre 14% (essence) et 18% (diesel) pour les véhicules thermiques et entre 22% (batteries au plomb) et 27% (batteries au lithium) pour les véhicules électriques¹⁶.

Un ingénieur-conseil en énergie consulté par la Fédération arrive à d'autres résultats¹⁷. Celui-ci calcule que, pour des véhicules similaires (même masse, mêmes performances) et utilisés de la même manière (consommation énergétique aux roues identiques), le rendement de la filière thermique (25%) est sensiblement supérieur à celui de la filière électrique (18%). A noter que le calcul est mené sans tenir compte des pertes énergétiques lors de la production des combustibles primaires (ceci pour les deux filières) et en considérant que le véhicule électrique est équipé de batteries neuves.

¹⁵ Le rendement « du puits à la roue », ou « well to wheel » (WTW) en anglais est égal au rendement « du puits au réservoir » (well to tank ou WTT) multiplié par le rendement « du réservoir à la roue » (tank to wheel ou TTW) //

¹⁶ European Association for Battery Electric Vehicles, 2008 //

¹⁷ Steffens [1], 2010 //

3 / 1 // efficacité énergétique

Inter-Environnement Wallonie s'est attaché à vérifier les rendements moyens des deux filières sur base de données moyennes établies à partir de différentes sources dont le Centre de recherches conjoint de la commission européenne (JRC). La méthode de calcul adoptée consiste à « remonter la filière » sur base d'une même énergie disponible aux essieux du véhicule (10 kWh en l'occurrence, soit l'énergie nécessaire pour parcourir 100 km avec un véhicule modeste)¹⁸.

Selon nos calculs, les rendements globaux des deux filières sont proches de 20%, ceci compte-tenu des filières de production des énergies primaires. La filière essence présente un rendement de 18%, la filière électrique de 20%, la filière diesel de 22% (voir détails et hypothèses de calcul en Annexe).

Les chiffres pour la filière électrique ont été établis en faisant l'hypothèse d'un rendement « charge/décharge » de la batterie de 80%, ce qui correspond à un fonctionnement dans de bonnes conditions d'une batterie au lithium neuve. Le rendement est plus bas pour une batterie âgée, si la charge est rapide et si la batterie est fortement sollicitée (décharge rapide: forte accélération, vitesse élevée du véhicule). Pour un rendement de la batterie de 70%, le rendement total de la filière électrique tombe à 17,5% pour un rendement énergétique du véhicule de 56%, ce qui représente une consommation de 18 kWh pour une énergie de 10 kWh aux roues.

Les chiffres établis par IEW semblent cohérents par rapport à ce que consomme un véhicule en conditions réelles d'utilisation.

En novembre 2009, Element Energy Ltd réalisait, à la demande du WWF Scotland, une étude relative aux véhicules électriques. La moyenne des consommations énergétiques déclarées par les constructeurs pour 14 véhicules électriques était de l'ordre de 13,9 kWh/100 km (**tableau 3**). Les consommations mesurées en conditions réelles pour quatre véhicules étaient de l'ordre de 29,5 kWh/100 km (**tableau 4**). Dans le cas de la Mitsubishi i-MIEV, la consommation officielle était de 10 kWh/100 km, celle mesurée est de 17 kWh/100 km. Pour la G-Wiz de REVA, la consommation passait de 12 déclarés à 21 kWh/100 km réels.

Parmi les facteurs explicatifs, citons la gestion de l'énergie de chauffage de l'habitacle, obtenue à partir de l'énergie calorifique des gaz d'échappement dans un véhicule thermique alors qu'elle est prélevée sur la batterie dans le véhicule électrique et représente dès lors une consommation supplémentaire¹⁹.

¹⁸ Remarquons que cette énergie correspond approximativement à celle fournie par une vingtaine de personnes fournissant un effort physique intense durant une journée //

¹⁹ Syrota, 2008 //

zoom

Le rendement des batteries en question

Par « rendement énergétique » ou « rendement charge-décharge » d'une batterie, il faut entendre le rapport (exprimé en pourcents) entre l'énergie délivrée par la batterie et l'énergie prélevée sur le réseau électrique pour la charger.

Les brochures de promotion des véhicules électriques mentionnent couramment des rendements de l'ordre de 90, 95 voire 99%. Ces chiffres ont de quoi interpeller.

En fait, le « rendement » auquel ils se rapportent n'est pas le rendement énergétique.

Il s'agit, dans la plupart des cas, du rapport entre la tension durant la décharge de la batterie et sa tension en « circuit ouvert » (lorsqu'elle ne délivre pas de courant).

En effet, lorsque l'on consomme du courant, la tension de la batterie chute instantanément, ceci en raison de sa résistance interne. Cette chute de tension est gênante pour les circuits électroniques en aval de la batterie, lesquels doivent être conçus pour pouvoir fonctionner correctement dans des conditions fluctuantes :

lors des fortes accélérations du véhicule ou aux vitesses élevées, la batterie est plus sollicitée, le courant délivré est plus élevé et la tension de décharge diminue.

Ce « rendement » a donc peu de rapport avec le rendement énergétique. Il n'en constitue même pas une image: aucune formule mathématique ne permet de calculer l'un sur base de l'autre.

Lors de la charge de la batterie, le même phénomène se produit: le courant de charge provoque une chute de tension et induit des pertes – lesquelles sont d'autant plus élevées que le courant est important. Et celui-ci augmente avec la vitesse de charge.

Le rendement énergétique est très difficile à calculer. Il est préférable de l'établir de manière empirique: mesurer toute l'énergie fournie lors de la charge et toute l'énergie restituée à la décharge. Le rendement peut cependant être calculé de manière approximative en multipliant le rendement de charge (ordre de 90% pour une batterie Li-ion) par le rendement interne à la batterie (principalement associé à des phénomènes chimiques et typiquement de l'ordre de 95%) et le rendement de décharge (ordre de 90%): $90\% \times 95\% \times 90\% = 77\%^{20}$.

Au-delà de ces aspects, d'autres facteurs influent sur le rendement: température d'utilisation, âge de la batterie, « historique » des cycles charge/décharge, etc. Le rendement moyen des batteries en conditions réelles d'utilisation est donc plutôt de l'ordre de 70%. Ce qui permet de comprendre pourquoi de telles différences existent entre la consommation annoncée par les constructeurs (ordre de 15 kWh/100 km) et la consommation en conditions réelles (ordre de 30 kWh/100 km). III

²⁰ Steffens [2], 2010 //

A *contrario*, en conditions urbaines, les arrêts fréquents sont favorables au véhicule électrique du fait 1) de la récupération d'énergie au freinage et 2) que le moteur ne tourne pas quand le véhicule est immobilisé, contrairement à celui d'un véhicule à moteur thermique (sauf si celui-ci est équipé de la technologie « stop-start »).

Tableau 3 : Consommations annoncées pour différents véhicules électriques

(source : Element Energy Limited, 2009)

| Constructeur | Modèle | Type | Autonomie (km) | Consommation officielle (kWh/100 km) |
|--|---------------------------|------------|----------------|--------------------------------------|
| REVA | G-Wiz | Micro car | 120 | 12 |
| Think | Think | Small car | 200 | 20 |
| Daimler | Electric smart car | Small car | 110 | 12 |
| Dynasty Electric Car | Dynasty IT | Small car | 50 | 0,23 |
| Mitsubishi | i-MIEV | Small car | 160 | 10 |
| NICE | Ze-0 MPV | Small car | 80 | 0,25 |
| NICE | Mega city | Small car | 100 | 12 |
| BMW | Mini-e | Medium car | 165 | 20 |
| General Motors | EV1 | Sports | 170 | 16 |
| Lightning Car Company | Lightning | Sports | 300 | 11 |
| Renault | Kangoo battery van | Van | 100 | 17 |
| Berlingo | Electric 500 ^e | Van | 100 | 25 |
| Phoenix Vehicles | Phoenix SUV | SUV | 160 | 22 |
| Toyota | RAV4 EV | SUV | | 17 |
| Moyenne | | | | 13,9 |
| Moyenne G-Wiz, i-MIEV, Berlingo | | | | 15,7 |

Tableau 4 : Consommations réelles mesurées pour différents véhicules électriques

(source : Element Energy Limited, 2009)

| Véhicule | Consommation réelle (kWh/100 km) |
|--|----------------------------------|
| G-Wiz | 21 |
| Berlingo electric van | 45 |
| Peugeot electric van | 35 |
| Mitsubishi i-MIEV | 17 |
| Moyenne | 29,5 |
| Moyenne G-Wiz, i-MIEV, Berlingo | 27,7 |

Les rendements énergétiques « du puits à la roue » des deux filières sont donc actuellement du même ordre de grandeur. Les perspectives de développements futurs laissent entrevoir que :

- de faibles améliorations du rendement de la filière thermique sont possibles en matière de production du carburant ; des améliorations plus importantes font l'objet de développements au niveau du groupe motopropulseur : *downsizing*, cycles de combustion, commande électronique des soupapes, réduction des frottements internes, technologie stop-start... ;
- des améliorations significatives du rendement de la filière électrique sont possibles au niveau de la production d'électricité tandis que les améliorations au niveau du véhicule semblent plus modestes et concernent principalement les batteries (maintien des performances tout au long de la durée de vie) ;
- des améliorations importantes applicables à tout type de véhicule sont possibles, la plupart ont d'ailleurs déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche : réduction du poids, aérodynamique, pneumatiques, air conditionné, aides à la conduite... ;
- le potentiel d'amélioration sur la totalité de la filière (du puits à la roue) est plus élevé pour la filière électrique que pour la filière thermique.

3 / 2 // demande supplémentaire en électricité

Si tout le parc automobile devenait électrique et si tous les kilomètres actuels étaient encore roulés, cela représenterait environ 24% de consommation électrique supplémentaire au niveau du pays. En effet, en Belgique, 210 millions de kilomètres sont roulés chaque jour par les voitures. La consommation réelle d'un véhicule électrique de milieu de gamme est approximativement égale à 25 kWh/100 km. Le rendement de distribution est égal à 90% (pertes sur le réseau électrique). Donc, pour rouler 100 km, il faut produire 27,8 kWh d'électricité. Soit, pour 210 millions de kilomètres, un total de 58,3 millions de kWh/jour. Or, la consommation électrique actuelle en Belgique s'élève à 88,8 TWh/an ou 243 millions de kWh/jour.

Dans l'optique d'une électrification partielle ou d'une très forte réduction du nombre de véhicules et/ou du nombre de kilomètres roulés (par exemple 10% des kilomètres actuellement roulés par les véhicules à moteur thermique transférés sur des véhicules électriques), le surcroît de consommation électrique serait très faible (de l'ordre de 2% dans ce cas de figure).

L'augmentation de la demande de l'ordre de 24% reste relativement modeste au niveau du pays. Cependant, au niveau mondial, la croissance importante du parc automobile et des kilomètres roulés risque, dans le scénario d'une électrification du parc, d'entraîner une véritable explosion de la demande en électricité. Le marché mondial, qui était de l'ordre de 38,7 millions de véhicules durant les années 2000 à 2002, a atteint 49,5 millions en 2007, valeur à laquelle il s'est plus ou moins stabilisé en 2008 et 2009, avant de repartir à la hausse en 2010²¹. En Chine, il y avait 3 véhicules pour 1000 personnes en 1985, 8 en 1995, 12 en 2000 et 38 en 2009, année durant laquelle 13,6 millions de voitures se sont vendues, chiffre en augmentation de 46% par rapport à 2000.

Ainsi donc, à politique inchangée, le parc automobile mondial actuellement estimé à environ 800 millions de véhicules est amené à croître fortement encore dans les prochaines années, tiré par les marchés des pays émergents (Chine et Inde en tête) mais également renforcé par les marchés des pays occidentaux où les parcs continuent à s'étoffer malgré un taux de motorisation parfois largement supérieur à 500 voitures pour 1000 personnes.

21 CCFA, 2010 //

3 / 3 // greening de la production d'électricité ?

Selon certaines analyses, la demande d'électricité induite par le développement des véhicules électriques créerait une incitation supplémentaire à orienter la production vers les sources d'énergie renouvelable (souci de voir la filière automobile devenir la plus «verte» possible). On doit toutefois se poser la question de savoir si augmenter la demande en matière de production électrique contribuera réellement (en faisant notamment sauter les verrous technologiques et politiques) à rendre plus verte une offre que l'on a déjà toutes les peines à verdir...

Cet aspect est intimement lié à celui de la recharge des batteries : dès lors qu'un nombre significatif de véhicules sont susceptibles d'être rechargés de manière aléatoire durant la journée, le risque est réel de voir augmenter la demande en électricité «*base load*» (production de base) actuellement assurée par les centrales classiques (gaz, charbon, nucléaire). A contrario, mettre en place les mécanismes techniques et fiscaux incitant les automobilistes à recharger leurs batteries durant les heures de production d'énergie renouvelable pourrait créer une incitation au développement de celles-ci.

Cette (hypothétique...) évolution verrait-elle le jour que resterait intact le problème central de la réponse à l'augmentation de la demande – aussi modeste soit-elle – en énergie électrique dans un contexte où il convient, au premier chef, de réduire la demande globale d'énergie.

3 / 4 // V2G – *vehicles to grid*

Le concept de V2G (*vehicles to grid*: des véhicules au réseau) se réfère à la possibilité d'utiliser les batteries des véhicules comme réserves pour le stockage de l'énergie électrique. Les batteries seraient préférentiellement chargées durant les périodes de moindre consommation, lorsque la production de base est excédentaire – ou durant les périodes de pointe de production d'énergie éolienne – et pourraient restituer cette énergie au réseau durant les pointes de consommation. Le V2G implique toutefois, pour pouvoir assurer les fonctions de roulage des voitures, d'utiliser des batteries surnuméraires. Et par conséquent de rendre plus prégnants encore les problèmes associés (exploitation des ressources naturelles, déchets en fin de vie...).

Le développement de ce concept reste fort hypothétique, au regard notamment du rendement médiocre du stockage de l'énergie sous cette forme (70% environ). Le stockage « embarqué », de faible capacité, n'est pas concurrentiel par rapport au stockage stationnaire, de grandes capacités, en raison à la fois de freins comportementaux et d'aspects technologiques et économiques.

Pour le stockage stationnaire, on utilise les batteries plomb-acide, nickel-zinc (Ni-Zn) et sodium-soufre (Na-S). Ces dernières, qui offrent une densité d'énergie proche de celle des batteries au lithium (100 à 120 Wh/kg), combinent les avantages d'un prix très faible (environ cinq fois moindre par kWh installé que celui des batteries plomb et Ni-Zn et dix fois moindre que les batteries Li-ion), d'une durée de vie très longue, d'une cyclabilité élevée et d'une autodécharge nulle. Ainsi, malgré la nécessité de protéger le sodium de tout contact avec l'eau et d'éviter au système des sollicitations mécaniques trop importantes, ce type de batteries (uniquement proposé par le fabricant japonais NGK Insulators) est actuellement le « meilleur choix » en la matière. A titre d'exemple d'application, une batterie Na-S de 34 MW est utilisée pour adapter au réseau une ferme éolienne de 51 MW de la Japan Wind Development Co²².

Par ailleurs, d'autres technologies de stockage que le V2G peuvent être utilisées pour pallier soit le caractère intermittent de la production d'électricité par la filière éolienne, soit l'inadéquation entre l'offre et la demande. Les centrales de pompage/turbinage sont actuellement dévolues à cette seconde fonction. Il s'agit de faire passer de l'eau, par pompage, d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur lorsque la production d'électricité est excédentaire et de laisser cette eau s'écouler en sens inverse lorsque la demande d'électricité excède l'offre: en s'écoulant, l'eau actionne des turbines qui produisent de l'électricité. La centrale de Coo, qui présente une capacité de stockage de 5.000 MWh et une puissance de 1.164 MW, offre un bilan énergétique global de l'ordre de 75%. Ce concept de V2G semble donc, pour l'heure, relever plus de la théorisation marketing en faveur de la voiture électrique que d'une réelle opportunité technologique.

22 Pluchet, 2010 //

3 / 5 // alternative aux agrocarburants

Si l'on se place dans la perspective d'un futur sans pétrole, l'électricité est la seule alternative actuelle aux agrocarburants en matière de motorisation des véhicules. Or, on sait aujourd'hui que la plupart des filières d'agrocarburants aggravent plus qu'elles ne résolvent les problèmes d'émissions de gaz à effet de serre. (Notamment en raison des changements d'affectation des sols: avant la première mise en culture à destination de la filière agrocarburants, une grande quantité de carbone – préalablement stocké dans la couverture végétale et dans le sol – est émise. En fonction des conditions préexistantes et de la filière, il faudra attendre de 15 à plusieurs centaines d'années pour que cette émission massive soit compensée par les réductions d'émissions associées à l'utilisation d'agrocarburants par rapport aux carburants fossiles. Pour en savoir plus au sujet des agrocarburants, on consultera utilement le site www.mangerouconduire.be).

La production d'énergie à partir de la biomasse est nettement plus performante via des filières alimentant en combustible solide des unités de production conjointe d'électricité et de chaleur. Selon le Centre de recherches conjoint de la Commission européenne, 1 MJ de biomasse remplace environ 0,95 MJ de pétrole dans les filières de production d'électricité alors qu'il n'en remplace que 0,35 à 0,45 dans le secteur des transports²³. Ainsi, d'un strict point de vue du rendement énergétique et du bilan carbone des filières, la filière biomasse -> électricité -> véhicule électrique est-elle à préférer à la filière biomasse -> agrocarburant -> véhicule thermique.

23 JRC [2], 2008 //

4 / voiture électrique & changements climatiques

Malgré un rendement énergétique sensiblement égal, les véhicules électriques sont, selon nos calculs, nettement moins émetteurs de CO₂ que les véhicules thermiques. Typiquement, pour une énergie à l'essieu de 10 kWh et un rendement optimal de batterie de 80% (voir chapitre précédent), la filière électrique produira 81 gCO₂ contre 123 pour la filière diesel et 148 pour la filière essence (soit des réductions de respectivement 34% et 45%). Il faut cependant prendre ces chiffres avec les précautions d'usages : les émissions du mix européen de production d'électricité sont ici prises égales à 465 gCO₂/kWh, chiffre officiel négligeant les émissions réelles de la filière nucléaire (dans son cycle complet, de l'extraction du minerai jusqu'au démantèlement des centrales et au stockage des déchets).

Les émissions pourraient encore baisser dès lors que l'électricité utilisée serait d'origine renouvelable. Selon Element Energy, Ltd, les émissions pourraient être de l'ordre de 30 gCO₂/km en 2020 à l'échelle de l'Ecosse si les émissions du mix énergétique passaient de 430 (valeur actuelle) à 193 gCO₂/kWh dans dix ans. Plus raisonnablement, si l'on estime que l'Europe atteindra en 2020 son objectif de 20% d'énergie issue de sources renouvelables, y compris pour la production d'électricité, et que le mix européen verra dès lors ses émissions abaissée à environ 420 gCO₂/kWh, les émissions de la filière véhicule électrique diminueraient à 73 gCO₂ pour 10 kWh à l'essieu (ceci toujours avec un rendement de batterie optimal de 80%), soit des réductions de 40% et 50% par rapport aux filières diesel et essence.

Il est toutefois primordial, dans le cadre du développement d'une filière énergétique durable, de mettre en place des garde-fous afin que l'éventuel développement des véhicules électriques favorise effectivement le développement des énergies renouvelables et ne soit pas utilisé comme argument pour le redéploiement de la filière nucléaire. Par ailleurs, le danger est réel de voir un « boum » de voitures électriques générer une augmentation des émissions de CO₂ via un recours accru au charbon pour la production d'électricité.

Les incidences liées aux émissions de CO₂ sont globales et la question des améliorations éventuelles apportées par les véhicules électriques doit donc être examinée à l'échelle de la planète. Ainsi, dans la perspective environnementale, une diminution locale d'émissions de CO₂ n'est en rien un progrès si elle est corrélée à une augmentation des émissions globales... Dès lors, de ce point de vue, une explosion de la motorisation électrique ne semble pas devoir constituer le progrès que l'on nous annonce.

A l'échelle mondiale, le charbon est la première source d'énergie primaire utilisée pour la production d'électricité. Il sert actuellement à produire quelque 41% de l'électricité mondiale et cette part devrait, selon l'Institut Mondial du Charbon, monter à 44% d'ici 2030. Le charbon est largement prédominant dans des pays comme l'Afrique du Sud (93%), la Pologne (92%), la Chine (79%), l'Australie (77%), l'Inde (69%), le Maroc (55%), les États-Unis (49%), etc. Dans son scénario de référence, l'Agence internationale à l'énergie (AIE) estime que *« comme le laissait présager l'augmentation spectaculaire de ces dernières années, c'est la demande de charbon qui augmente le plus en termes absolus, faisant un bond de 73% entre 2005 et 2030, ce qui porte de 25% à 28% sa part dans la demande totale d'énergie. La majeure partie de l'augmentation de la consommation de charbon provient de la Chine et de l'Inde. »*²⁴

Dans de nombreux pays, notamment les pays émergents, cette situation a pour conséquence un mix de production d'électricité très médiocre. Si l'on examine le cas de la Chine, devenue en 2009 le premier marché automobile mondial (ainsi que le premier consommateur d'énergie et le premier émetteur de CO₂), il faut considérer un mix de production d'électricité responsable d'émissions équivalentes à 854 gCO₂/kWh. Pour l'Inde, les émissions de CO₂ par unité d'énergie électrique sont plus élevées encore, à 874 gCO₂/kWh²⁵. Avec de tels chiffres, le bilan CO₂ de la voiture électrique est nettement moins attractif : il pourrait même être moins bon encore que celui des voitures thermiques. A titre d'exemple, appliquer le calcul repris en Annexe (véhicule utilisant 10 kWh à l'essieu pour 100 km) à la Chine (ou à l'Inde) et à son mix actuel d'électricité donne des émissions de 160 gCO₂/km (163), soit des niveaux supérieurs à ceux des véhicules essence ou diesel de même puissance.

24 IEA, 2007 //

25 PWC, 2007 //

Il est illusoire de penser que la voiture électrique, objet de luxe (vu son prix) et d'image «branchée», sera uniquement implantée dans les pays qui ont une production d'électricité «propre». Dans un monde où les échanges sont libéralisés et où les comportements de consommation des masses sont de plus en plus guidés par l'imitation des classes occidentales les plus aisées, la voiture électrique sera mondiale ou ne sera pas. La Chine, d'ores et déjà premier marché au monde en ce qui concerne les voitures de sport et de luxe, est aussi un des marchés les plus prometteurs en ce qui concerne la voiture électrique. C'est dès lors bien dans une perspective mondiale que l'introduction à large échelle de la voiture électrique doit être étudiée et ses conséquences évaluées.

Le Comité économique et social européen ne dit rien d'autre dans un avis rendu le 14 juillet 2010: «*Le CESE souligne que le passage aux VE ne peut engendrer une réduction des émissions de gaz à effet de serre que si l'électricité utilisée par ces véhicules provient de sources à faibles émissions de carbone ou à émissions nulles. Dès lors, cette évolution vers les VE doit s'accompagner d'une autre, dans le cadre de laquelle la production d'électricité s'oriente vers une diminution de sa teneur en carbone.*»²⁶

26 CES, 2010 //

4 / 1 // perspectives à dix ans

Il n'est pas inutile de mener un rapide calcul afin de chiffrer les réductions d'émissions engendrées par le remplacement d'un certain nombre de véhicules à moteur thermique par des véhicules électriques.

De nombreux scénarios de pénétration des véhicules électriques et hybrides ont été étudiés par différentes administrations nationales, agences internationales et sociétés de consultance. Une étude commanditée par la Fédération européenne Transport and Environment²⁷ en présente quelques-uns. Les scénarios les plus optimistes quant à la pénétration des véhicules électriques font état d'une évolution des marchés telle que le parc pourrait être constitué de 10% de véhicules électriques à l'horizon 2020. Etant donné les dynamiques industrielles et la durée de vie moyenne des véhicules, on estimera plus raisonnablement entre 5% et 10% la proportion de voitures électriques dans le parc européen en 2020.

Considérant que la moyenne des émissions des véhicules thermiques circulant en 2020 devrait être de l'ordre de 130 gCO₂/km (hypothèse haute) et celle des véhicules électriques de 50 gCO₂/km (hypothèse basse: développement des énergies renouvelables au-delà des objectifs européens), 5% (10%) de véhicules électriques entraîneraient une réduction de 3,1% (6,2%) des émissions du secteur et de 0,7% (1,4%) des émissions du pays²⁸. Prenons maintenant le cas d'hypothèses moins favorables aux véhicules électriques: 120 gCO₂/km pour les véhicules thermiques à l'horizon 2020 et 80 gCO₂/km pour les véhicules électriques. Les réductions d'émissions pour 5% (10%) de véhicules électriques deviennent alors 1,7% (3,3%) pour le secteur et 0,4% (0,8%) pour le pays.

Comme on le voit, quelle que soit l'hypothèse considérée, les perspectives de réductions d'émissions restent relativement modestes. Il est possible d'obtenir des réductions largement supérieures par des politiques de maîtrise du volume de transport, lesquelles offrent en outre l'avantage de diminuer l'ensemble des incidences négatives du modèle actuel de transport et sont plus en phase avec les recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour lequel des réductions d'émissions de 25 à 40% doivent être réalisées dans nos pays à l'horizon 2020. C'est ce que met en relief l'étude de Element Energy Ltd: stabiliser le nombre de kilomètres roulés en Ecosse au niveau de 2001 conduirait, si l'évolution des motorisations thermiques est conforme aux tendances actuelles, à des réductions d'environ 40% par rapport à l'année de référence 1990.

27 CE Delft, 2010 //

28 En 2009, une étude du WWF Allemagne arrivait à des conclusions similaires. En faisant l'hypothèse de 20 millions de véhicules électriques ne produisant aucune émission (horizon 2020), les réductions obtenues se chiffraient à 2,4% des émissions totales du pays //

5 / problème central : les batteries

Parmi les six plans du Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie du Japon (METI) visant à développer les véhicules électriques, l'un est consacré aux batteries (avec pour objectif d'en améliorer les performances et la sûreté) et un autre aux métaux rares (avec l'objectif d'assurer l'approvisionnement et leur retraitement).

De même, le Conseil européen pour la recherche et le développement dans l'automobile²⁹ (EUCAR: European council for automotive R&D) estime que les efforts doivent se porter sur le développement de:

- batteries sûres, de prix acceptable (150€/kWh en 2020), présentant de meilleures performances (200 Wh/kg en 2020) et durées de vie (5000 cycles charge/décharge en 2020);
- systèmes efficaces de gestion du véhicule et de l'énergie (amélioration de l'efficacité, diminution du coût de la chaîne de traction, architecture du système, électrification du chauffage...);

²⁹ EUCAR, 2009 //

- interfaces entre les véhicules et l'infrastructure de transport d'électricité (systèmes de recharge rapide, de recharge sans contact, d'information pour optimiser la charge en fonction de la disponibilité sur le réseau...).

Ainsi, tous les acteurs du secteur sont unanimes pour considérer que le problème du stockage de l'énergie à bord du véhicule (dans toutes ses dimensions, y compris l'approvisionnement en matières premières) est central. De la possibilité de développer des systèmes performants, financièrement abordables et compatibles avec les réserves en ressources naturelles dépend l'avenir de la filière voiture électrique...

5 / 1 // une technologie au-dessus du lot

La batterie, équivalent du réservoir de carburant dans un véhicule thermique, doit assurer le stockage et la restitution de l'énergie dans de bonnes conditions de fiabilité et de sécurité. Elle peut être caractérisée par quatre propriétés principales :

- la densité d'énergie massique (ou l'énergie spécifique), exprimée en Wh/kg, ou encore la quantité d'énergie stockée par unité de masse ;
- la densité d'énergie volumique, en Wh/l, qui mesure la quantité d'énergie stockée par unité de volume ;
- la densité de puissance, en W/kg, qui indique la puissance qui peut être délivrée par unité de masse ;
- la « cyclabilité », exprimée en nombre de cycles (charge-décharge), qui caractérise la durée de vie de la batterie. Si le véhicule doit être rechargé 3 fois par semaine, une durée de vie de cinq ans suppose 780 recharges.

Par ailleurs, pour être performante, une batterie doit :

- offrir une large plage de températures d'utilisation ;
- ne pas s'auto-décharger de manière trop importante ;
- présenter un coût modéré (le coût se mesure en € par kWh) ;
- utiliser des matériaux disponibles en quantité suffisante pour pouvoir équiper plusieurs centaines de millions de véhicules ;
- présenter un bon rendement énergétique charge/décharge ne se détériorant pas trop au cours du temps.

Parmi les différentes technologies actuellement disponibles ou faisant l'objet de travaux de recherche-développement, celle qui présente le meilleur compromis entre les différentes caractéristiques et offre dès lors les meilleures perspectives d'avenir est la batterie lithium-ion. De nombreux constructeurs ont investi dans cette technologie. Sans être exhaustif, citons BMW, Général Motors, Mercedes, Mitsubishi, PSA Peugeot-Citroën, Renault-Nissan, Subaru, Toyota, Volkswagen.

De nombreux véhicules électriques actuels sont cependant encore équipés de batteries de type « nickel – hydrure métallique » (Ni-MH) voire de batteries au plomb.

zoom

La batterie Li-ion

Une batterie est un ensemble d'accumulateurs couplés. L'énergie y est stockée sous forme électrochimique et le courant électrique y est généré par une réaction d'oxydoréduction au cours de laquelle se produit un transfert d'électrons. Ce transfert se réalise par migration d'ions entre deux électrodes séparées par un électrolyte. La transformation électrochimique, qui est réversible, permet de charger et de décharger la batterie.

L'anode (électrode négative lors de la décharge), la cathode (électrode positive) et l'électrolyte sont les trois éléments qui déterminent, en fonction de leur composition, le type de la batterie. Le choix des matériaux et leur bonne association définissent les caractéristiques de la batterie décrites ci-dessous. L'emploi du lithium a permis d'améliorer significativement les performances des batteries.

Derrière l'appellation générique «lithium-ion» (Li-ion) se cachent en fait de nombreuses technologies spécifiques. Une distinction peut être opérée entre batteries utilisant un électrolyte liquide et batteries utilisant un électrolyte polymère (sous forme de gel). Par ailleurs, de nombreux composés différents peuvent être utilisés pour la cathode, parmi lesquels le dioxyde de cobalt et de lithium (LiCoO₂), des composés lamellaires utilisant également du cobalt, des composés de type olivine (tels le phosphate de fer LiFePO₄)... Pour l'anode, c'est principalement le graphite et l'oxyde de lithium et de titane (Li₄Ti₅O₁₂) qui sont utilisés.

*Quelle que soit la technologie spécifique, les batteries au lithium présentent (**tableau 5**) une meilleure densité d'énergie massique que leurs concurrentes, à l'exception des batteries Na-S qui ne se prêtent toutefois pas aux applications mobiles. Elles présentent aussi l'avantage d'un poids réduit.*

*La simple amélioration des accumulateurs Li-ion ne permettra pas d'aller au-delà d'une densité énergétique de 300 Wh/kg. A moins d'un saut technologique important, il semble que cette filière approche de son optimum (**figure 3**). Pour accroître davantage la sécurité, la cyclabilité et les performances des batteries, l'utilisation de nouveaux composés n'est pas suffisante. Il est nécessaire d'ouvrir de nouvelles voies de développement et en particulier de travailler sur le renouvellement total du principe d'un accumulateur Li-ion. Trois technologies sont identifiées comme prometteuses : Li-air, Li-S et l'électrolyte solide.*

Pour garantir aux voitures des autonomies comparables à celles des voitures thermiques, certains rêvent déjà à «l'après-lithium» mais aucune solution n'est identifiable actuellement. Le lithium continue dès lors à faire l'objet de toutes les attentions. ///

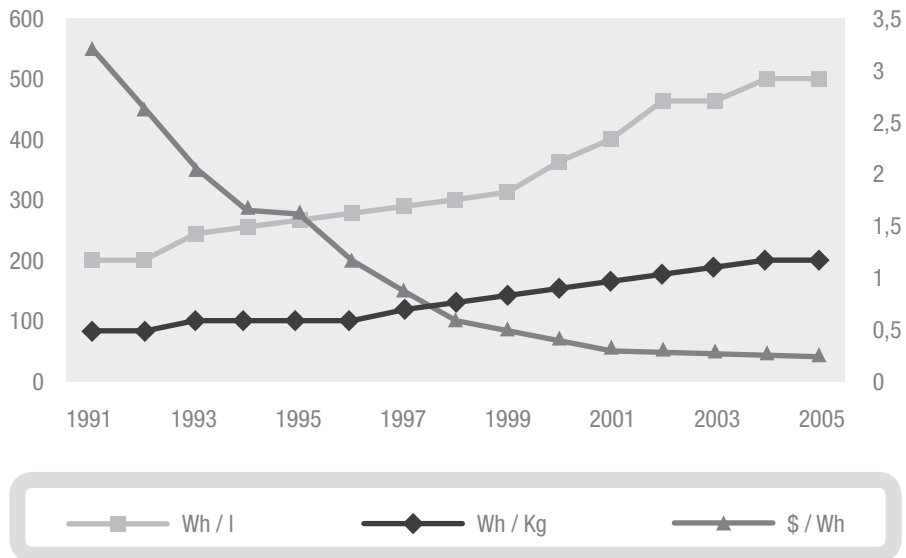
Tableau 5 : Comparaison de différents types de batteries

(source : Pluchet., 2010)

| | Plomb | Ni - Cd | Ni - Zn | Ni - MH | Na - S | Li - ion | Li - Po |
|--------------------------------------|-------------|---------------|----------|-------------|---------------|---------------|-------------|
| Densité d'énergie massique (Wh/kg) | 30 - 50 | 30 - 50 | 70 - 80 | 60 -110 | 100 - 120 | 100 - 150 | 100 -130 |
| Densité d'énergie volumique (Wh/l) | 40 -100 | 80 - 150 | 120 -140 | 220 - 330 | 150 -200 | 200 - 400 | 300 |
| Densité de puissance massique (W/kg) | 700 | 150 | 1.000 | 900 | 150 - 160 | 1.000 - 1.500 | 250 |
| Durée de vie (ans) | 4 - 5 | | 6 - 8 | 6 - 8 | 15 | 5 - 8 | 10 |
| Cyclabilité (nombre de cycles) | 500 à 1.200 | 1.500 à 2.000 | > 1.000 | 800 à 1.000 | 2.500 à 4.500 | 1.000 | 500 à 1.000 |

Figure 3 : Evolution des batteries lithium ion pour l'électronique grand public

(source : Syrota, 2008)



5 / 2 // des incertitudes lourdes de conséquences

Selon la fédération Transport and Environment, « les performances et le coût des batteries sont l'un des principaux obstacles au développement des véhicules électriques. La technologie lithium-ion paraît être la plus prometteuse, quoiqu'aucune étude ne prévoise une baisse rapide de ses coûts de fabrication. Il existe un potentiel réel en matière d'amélioration des performances et de réduction des coûts à moyen terme, mais il n'est pas suffisant pour suggérer que les véhicules électriques puissent jouer à armes égales contre les véhicules conventionnels dans les deux prochaines décennies. Des études plus approfondies sur les impacts environnementaux et sur la consommation énergétique de la fabrication et du recyclage des batteries sont requises. »³⁰

Ainsi donc, les incertitudes les plus grandes se manifestent sur les plans suivants :

- les impacts environnementaux associés au cycle de vie des batteries, notamment la toxicité de certains matériaux (tels le cobalt) et les impacts de l'exploitation de ressources naturelles jusqu'ici peu sollicitées ;
- les impacts sociaux associés au cycle de vie des batteries, notamment via l'exploitation de ressources localisée dans des pays en voie de développement ;
- la disponibilité des éléments constitutifs des batteries et les aspects géopolitiques associés (cette question étant également prégnante pour certains éléments utilisés dans les moteurs électriques, tel le néodyme pour les aimants) ;
- les possibilités de diminuer le coût des batteries.

Selon une société spécialisée dans le recyclage des batteries, « au-delà des nombreux avantages liés à leurs performances, les systèmes au lithium restent une source importante de produits ayant un impact environnemental reconnu. Les effets sont liés principalement aux composants suivants : métaux lourds, sels conducteurs à base de fluor ou d'arsenic, solvants organiques et lithium, un métal alcalin très réactif »³¹.

30 T&E, 2009 //

31 Recupyl, 2010 //

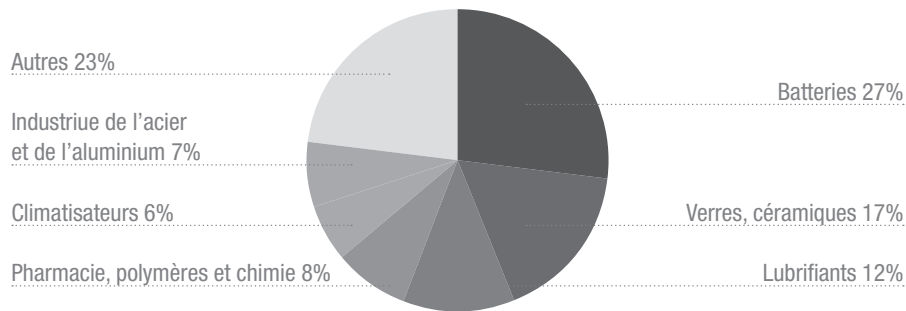
5 / 3 // électronique portable VS voitures électriques

Les batteries constituent depuis quelques années le principal domaine d'utilisation du lithium (**figure 4**). Il est ensuite demandé par les industries du verre et de la céramique qui l'utilisent pour augmenter la résistance aux chocs des matériaux.

En 2005, les batteries représentaient 19% de la demande de lithium ; en 2008, cette part est passée à 27%. La croissance a d'abord été imputable à l'essor des batteries rechargeables pour matériel électronique (ordinateurs et téléphones portables) ; à l'avenir, elle devrait venir du secteur automobile. Cette évolution attise bien évidemment diverses convoitises.

Figure 4 : Répartition de la demande mondiale de lithium en 2008 par secteurs

(source: IFP, 2010)


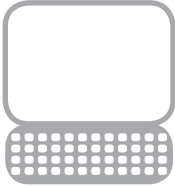




En 2009, le marché mondial des batteries Li-ion représentait 7,65 milliards d'€ (G€), répartis à 97% sur les équipements électroniques et seulement 3% sur les véhicules électriques et hybrides. Pour l'année 2010, la part de ces derniers devrait grimper à 27% avec 2,7 G€ sur un marché de 10,2 G€. Dès 2012, la part des batteries à destination des véhicules devrait dépasser celle des équipements portable (65% contre 35%) et atteindre la somme de 14, 4 G€³². On peut donc parler de flambée du marché, avec une augmentation de 6.200% en l'espace de trois ans... A condition que l'offre puisse suivre la demande.

Ce phénomène est facilement compréhensible : la capacité des batteries d'un véhicule électrique (de l'ordre de 20 kWh) est presque 300 fois plus élevée que celle d'un ordinateur portable (70 Wh) et environ 8.000 fois plus élevée que celle d'un téléphone portable (2 à 3 Wh) (**figure 5**).

32 Pluchet, 2010 //

Figure 5 : Capacité des batteries pour diverses applications

| | | |
|---|--|---------------------------------|
|  | <p>CAPACITÉ 2 à 3 Wh</p> <p>POIDS 25 g</p> | <p>PROPORTION 1</p> |
|  | <p>CAPACITÉ 70 Wh</p> <p>POIDS 700 g</p> | <p>PROPORTION 28</p> |
|  | <p>CAPACITÉ 250 Wh</p> <p>POIDS 2,5 kg</p> | <p>PROPORTION 100</p> |
|  | <p>CAPACITÉ 20 kWh</p> <p>POIDS 200 kg</p> | <p>PROPORTION 8000</p> |

5 / 4 // ressources en lithium : estimations variées

Selon Axeon, qui s'auto-définit comme le plus grand fournisseur indépendant européen de système de batteries Li-ion, il faut environ 0,3 kg de Li par kWh de capacité de la batterie. Une batterie de 20 kWh réclamera donc environ 6 kg de Li³³.

Les chiffres sur lesquels s'appuie l'industrie automobile font état de réserves suffisantes pour équiper le parc mondial de véhicules privés. Certaines sources citent ainsi le chiffre de 20 millions de tonnes de lithium. Pour Renault, il faut plus modestement tabler sur quatre millions de tonnes de lithium métallique, ce qui permettrait d'équiper 2,4 milliards de packs de batteries (en faisant l'hypothèse de 40% de batteries de 24 kWh, 30% de 10 kWh et 30% de 2 kWh, les deux dernières catégories étant destinées aux véhicules hybrides). A noter que ces chiffres supposent que 0,125 kg de Li – et non 0,3 – soient utilisés par kWh de capacité de la batterie.

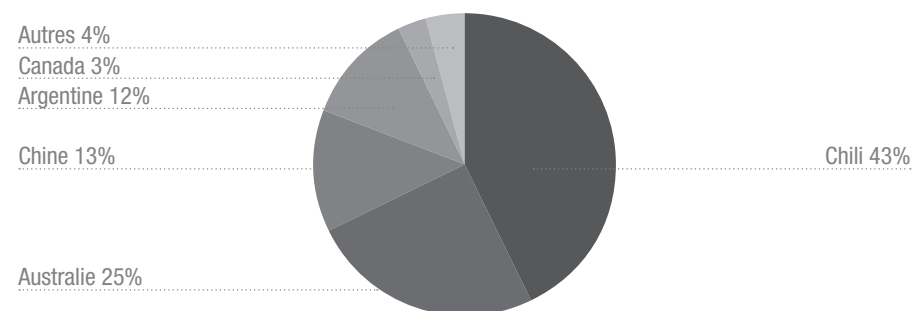
Différents commentaires doivent être apportés quant à ces chiffres.

1. Ils font état de 40% de batteries destinées à des véhicules électriques purs d'autonomie limitée (en conditions réelles, une batterie de 24 kWh offre une autonomie d'environ 150 km) ; une solution envisagée pour répondre au problème de la limitation d'autonomie réside dans un système d'échange de batteries, ce qui suppose au moins trois batteries par véhicule dans l'hypothèse d'un système parfaitement organisé ; le nombre de véhicules serait réduit d'autant.
2. Ils font l'impasse sur la demande concurrente : industrie du verre, pharmacie, métallurgie... C'est principalement le secteur de l'électronique portable (GSM, ordinateurs...), qui représentaient déjà un quart de la demande en 2008 et dont la forte tendance haussière ne semble pas faiblir, qui se positionnera en concurrent n° 1 des véhicules électriques.
3. Ils font abstraction de la vitesse de production du lithium : en 2008, la production s'établissait à 27.800 tonnes annuelles (**figure 6**).
4. Les principaux gisements de lithium sont situés en Amérique latine et au Tibet. Les enjeux géopolitiques sont énormes, l'accès aux ressources n'est pas garanti.
5. L'exploitation des gisements est potentiellement très impactant sur les milieux naturels et les populations riveraines (voir plus loin).

33 Axeon, 2010 //

Figure 6 : Répartition géographique de la production mondiale de lithium en 2008

(source : IFP, 2010)



5 / 5 // incidences environnementales

En raison de sa grande réactivité chimique, le lithium ne se trouve pas à l'état naturel sous sa forme métallique. On le trouve principalement dans :

- les saumures des lacs salés intracontinentaux, principalement les salars d'Amérique du Sud (Argentine, Bolivie, Chili) et les chlorures (LiCl) des lacs tibétains ;
- la pegmatite, roche cristalline proche du granite où il est présent sous forme de silicates tels que le spodumène ($\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) ;
- l'hectorite, un minéral du groupe des argiles résultant de l'altération de certaines roches volcaniques ;
- l'eau de mer, sous forme de chlorures, mais en concentrations bien moins importantes que dans les lacs salés : 0,17 ppm (parts par million) contre 300 à 3000 ppm environ. Ces concentrations infimes rendent illusoire tout espoir d'extraction à grande échelle : des tests menés à l'Université de Saga, au Japon, ont permis d'extraire 30 grammes de chlorure de lithium (LiCl), soit 5 g de Li, à partir de 130.000 litres d'eau de mer...

Outre qu'ils sont des sites naturels d'une très grande beauté, les salars d'Amérique du Sud, qui concentrent environ 70% des réserves exploitables, constituent des écosystèmes uniques que l'extraction du lithium à grande échelle mettrait en danger. Ainsi, depuis plusieurs années, le niveau d'eau décroît dans le salar de Atacama, lac salé chilien qui est le plus important site producteur au monde. Deux phénomènes sont en cause : un épisode de sécheresse générale auquel s'ajoute le pompage de l'eau par l'activité minière et par la SQM, une usine d'extraction de lithium installée sur le salar. Cette baisse du niveau perturbe toute la chaîne trophique de cet écosystème. Le salar compte trois espèces de flamants dont les recensements récents indiquent une diminution de la population, laquelle est imputable à la diminution de la nourriture disponible. Le flamant filtre les micro-organismes aquatiques (algues, plancton, artémias) à l'aide des fanons de son bec. La quantité de ces organismes halophiles (« *qui aiment le sel* ») dépend de la concentration en sel de l'eau. Comme le niveau d'eau baisse, la teneur en sel augmente perturbant ainsi le développement des micro-organismes dont se nourrissent les flamants.

Aux États-Unis, la volonté forte du gouvernement de réduire la dépendance du pays vis-à-vis des hydrocarbures en développant notamment l'électrification du domaine des transports a donné un nouveau souffle à l'industrie du lithium. Ainsi, des travaux d'exploration sont relancés ou de nouveaux permis sont pris, notamment au Nevada. Le Department of Energy (DoE) soutient les initiatives par l'octroi de fonds dédiés aux projets de production de matériaux pour les batteries lithium-ion.

Au Canada, les travaux d'exploration du lithium ont également repris, notamment en Ontario et au Québec³⁴.

En Australie, en Chine, etc. : les projets d'exploitation fleurissent un peu partout dans le monde. Et les incidences environnementales ne figurent pas au rang des préoccupations premières des porteurs de ces projets !

5 / 6 // le paradoxe du recyclage

Etant données les incertitudes qui pèsent sur les réserves de lithium et sur sa production future, son recyclage revêt une importance première pour le secteur.

Actuellement, le lithium est peu recyclé. Il est surtout incinéré car présent en très petites quantités et difficilement séparable des autres constituants. Des procédés de récupération existent cependant, comme ceux de la société Toxco ou de Sony-Sumitomo, qui permettent de récupérer plus de 95% du lithium³⁵. On peut également citer le procédé de la société Récupyl ou celui breveté par Umicore.

Deux conditions sont requises pour assurer un taux de recyclage satisfaisant :

- la mise en place de structures et règlements assurant que les batteries vivent en « circuit fermé » ;
- ou/et un prix du lithium suffisamment haut pour que le métal recyclé soit concurrentiel par rapport à la matière première.

Ainsi, en l'absence de pilotage public, c'est le marché qui déterminera à quel moment les filières de recyclage, technologiquement mûres, pourront offrir tout leur potentiel.

35 IFP, 2010 //

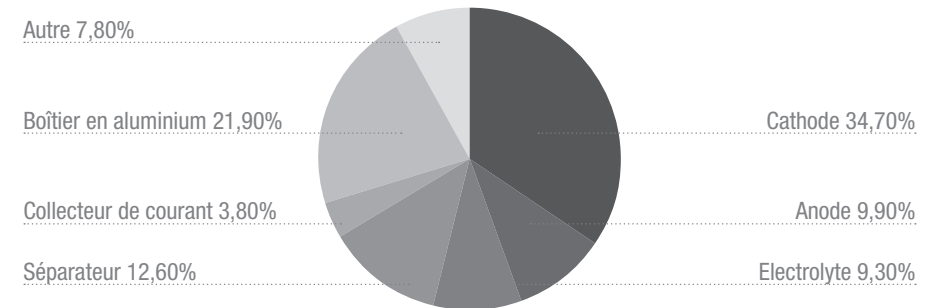
5 / 7 // un coût conséquent

Le prix du lithium est en augmentation constante depuis quelques années. Il est passé de 300 dollars la tonne de carbonate de lithium dans les années 90 à 5.000 \$/t en 2008³⁶ et au delà des 6.000 dollars en 2009.

Étant donné le petit nombre d'acteurs, les prix sont actuellement fixés par les producteurs dans le cadre de contrats de vente. Il n'y a pas de cotations internationales. Mais en dépit de cette situation, le prix du lithium n'est pas, à l'heure actuelle, le facteur déterminant dans le coût d'une batterie. Pour un prix du carbonate de lithium de 6.000 dollars la tonne et estimant à 300 g la quantité de lithium par kWh, une batterie de 25 kWh contiendra pour 240 dollars de lithium.

La réduction du coût des batteries passera dans un premier temps par des économies d'échelle. Mais, au-delà de cette massification de la production, le développement de matériaux utilisant des composés moins chers est essentiel. Nombre de travaux de recherche sont actuellement focalisés sur la cathode de la batterie, laquelle représente environ un tiers du coût total (**figure 7**). Cela est grandement dû à l'utilisation du cobalt. Son remplacement par des éléments tels que le nickel, le zinc ou le manganèse aurait un impact très significatif sur le coût de cette cathode et donc de la batterie.³⁷

Figure 7 : Répartition du coût d'une batterie Li-ion à cathode en composé lamellaire
(source : Pluchet, 2010)



36 IFP, 2010 //

37 Pluchet, 2010 //

6 / voiture électrique : enjeux divers

6 / 1 // qualité de l'air et bruit : évolution positive

Un véhicule électrique ne rejette aucun polluant lors de son utilisation, hormis les poussières d'usure des pneus et freins. La pollution locale qu'il engendre lors de son utilisation peut dès lors être considérée, en première approche, comme nulle comparée à celle d'un véhicule à moteur thermique. Ceci constitue un incontestable avantage en milieu urbain, là où les incidences des transports en termes de santé sont les plus prégnantes.

De même, vu l'absence de bruit moteur, le véhicule électrique ne produit en pratique aucune pollution sonore aux vitesses modérées (en-dessous de 50 km/h) pour lesquelles les bruits de roulement sont très réduits. Pour répondre aux éventuels problèmes de sécurité que cela pourrait poser par rapport aux usagers faibles, piétons et cyclistes qui « *n'entendraient pas venir* » les véhicules électriques, la Commission européenne a décidé d'imposer des normes de bruit minimal des véhicules.

6 / 2 // autonomie : le verre à moitié plein...

La moyenne des autonomies théoriques des véhicules électriques actuels est de l'ordre de 150 km, ce qui est compatible avec les habitudes de mobilité en Europe occidentale. En effet, le kilométrage moyen d'un véhicule automobile est de l'ordre de 15.000 km/an, soit 300 km par semaine. Une autonomie de 150 km suppose donc trois (pour conserver une certaine réserve d'autonomie) charges hebdomadaires des batteries. Se pose cependant la question des trajets de l'ordre de 130 km ou plus qu'il serait risqué – voire impossible – d'entreprendre avec un véhicule proposant une autonomie théorique de 150 km. Se pose aussi la question de la fiabilité des valeurs d'autonomies avancées par les constructeurs, les conditions réelles d'utilisation pouvant mener à des autonomies réduites de moitié.

Le citoyen achète actuellement sa voiture en fonction de ses besoins maximaux qui sont typiquement définis par l'utilisation durant les vacances (famille complète et bagages volumineux, longues distances). La question de l'autonomie renvoie donc directement à celle de la modification des pratiques de mobilité, qui peuvent s'orienter soit vers le développement de la multimodalité (différents modes de transport en fonction du type de trajets), soit vers celui de la multimotorisation (possession de plusieurs véhicules personnels adaptés à différents types de trajets – voir point 6.6.). Afin d'éviter de voir les pratiques évoluer dans cette deuxième voie, un travail sur l'image de la voiture est plus que jamais indispensable.

6 / 3 // taille des véhicules : opportunité à concrétiser!

Les véhicules électriques, qui pénètrent sur le marché par la «porte» des petites voitures, offrent une opportunité de développer ce segment, moins polluant tant lors des phases de production et de recyclage des véhicules que durant leur utilisation (voir chapitre 7).

Il est cependant à craindre que cette opportunité ne se concrétise pas... Des véhicules haut de gamme sont en effet déjà proposés en version électrique, comme la Tesla Roadster, la Lightning, le SUV de Phoenix ou, plus modestement, la RAV4 EV de Toyota.

Il est symptomatique que les deux premières voitures électriques qui seront proposées par Renault (qui affiche son ambition de se positionner comme leader sur ce marché) dès janvier 2012 seront la Fluenza ZE, une berline familiale de 1.540 kg, et la Kangoo ZE, un utilitaire léger de 1.400 kg.

6 / 4 // effet d'aubaine

La construction automobile a connu globalement des conditions idéales durant les quatre dernières décennies du XXème siècle. Secteur économique important, sa production était l'objet d'une adulation sans faille de la part d'une importante partie de la population et s'écoulait sans peine sur un marché en expansion continue. Sa force économique était telle que le secteur avait réussi à dissuader les pouvoirs publics d'établir des normes de produits trop restrictives : rien ne s'opposait à la production et à la mise en vente de véhicules toujours plus lourds, plus puissants, plus rapides (donc plus dangereux pour les autres usagers de la route) et offrant des marges bénéficiaires toujours plus confortables. La politique de développement des réseaux routiers prévalant dans la plupart des pays occidentaux créait les conditions idéales à la croissance du parc automobile.

Depuis quelques années, la situation a légèrement évolué. En raison à la fois de la consommation énergétique du secteur des transports, de ses émissions de gaz à effet de serre ou encore des problèmes de sécurité routière, la voiture a peu à peu été dénoncée dans tous ses excès. Ainsi, il a été interdit de mettre en avant dans les publicités les performances en termes de vitesse. Dans son code de la publicité, la Fédération belge de l'industrie automobile (FEBIAC) stipule que *«la publicité ne peut argumenter sur la vitesse, en particulier la vitesse de pointe ou suggérer son attrait. Il en est de même pour la puissance, l'accélération, la force de freinage ou toute autre caractéristique d'un véhicule si celles-ci font référence à la vitesse»*³⁸. Dès lors, les constructeurs voient dans la voiture électrique une opportunité de redorer (ou plutôt de «verdir») l'image de l'automobile. *«Faire que l'automobile soit à nouveau perçue comme un progrès pour l'humanité et pour la planète»*³⁹ est l'enjeu identifié par Carlos Ghosn, PDG de Renault, lors du Mondial de l'auto de Paris en 2010. Il déclarait également *«je pense que le véhicule électrique est une orientation inéluctable et que s'engager sur cette voie aura beaucoup de conséquences. A commencer par l'image.»*⁴⁰

La motorisation électrique permet de continuer à proposer aux citoyens des véhicules surdimensionnés par rapport aux besoins réels tout en s'affranchissant des critiques éventuelles quant à leur impact environnemental. Mille fois répétée, l'assertion véhicule électrique = véhicule «propre» a, dans l'imaginaire populaire, acquis le statut de vérité intangible. Les argumentations les plus rationnelles qui en démontrent le caractère réducteur (non prise en compte des autres incidences – dont celles des infrastructures – ni du cycle de vie complet des véhicules) sont dès lors bien peu prises en compte...

³⁸ FEBIAC, 2008 //

³⁹ «Voiture électrique: l'envol, enfin», in Vers l'Avenir, 01 octobre 2010 //

⁴⁰ «Je suis sûr que la voiture électrique sera un succès», in Le Monde, 29 septembre 2010 //

6 / 5 // effet rebond

Actuellement, quoique cher à l'achat, un véhicule électrique peut se révéler financièrement intéressant à l'utilisation en raison du faible coût de l'énergie électrique par rapport aux carburants conventionnels.

Typiquement, un véhicule thermique utilisant 10 kWh à l'essieu pour parcourir 100 km consommera environ 4 l de diesel, soit 4,8€. Pour 10 kWh à l'essieu, un véhicule électrique consommera environ 17 kWh, soit 1,2€⁴¹ ou un quart du coût du carburant fossile. Pour un kilométrage annuel de 15.000 km, la différence se chiffre à environ 540€.

Du fait de ces coûts d'utilisation très faibles par rapport aux habitudes acquises en matière d'utilisation des véhicules automobiles conventionnels, il existe un réel risque de voir augmenter le nombre de kilomètres roulés. Ceci dans un premier temps du moins. Par la suite, on peut imaginer que les pouvoirs publics mettent en place les infrastructures, mécanismes et outils fiscaux nécessaires pour amener la taxation à l'utilisation des véhicules électriques à un niveau comparable à celui existant pour les véhicules thermiques.

⁴¹ Sur base d'un prix du diesel de 1,2€/l et d'un prix moyen du kWh électrique de 0,07€ //

6 / 6 // effet d'addition

Le parc automobile belge compte aujourd'hui 5.276.283 voitures (chiffre au 1^{er} août 2010), soit un véhicule pour 2 habitants. Ce parc, bien évidemment, est fort inégalement réparti. Certains ménages sont sur-motorisés (23,3% des ménages belges ont deux ou plus de deux voitures), tandis que d'autres (principalement parmi les catégories socioprofessionnelles les moins favorisées) ne possèdent pas de véhicule (19,2% des ménages belges⁴²).

Les citoyens achètent généralement leur véhicule en fonction de son utilisation maximale or, les véhicules électriques présentent de faibles autonomies. Le risque est dès lors grand de voir – du moins parmi les citoyens les mieux lotis financièrement – se développer la multi-motorisation. Les ménages achèteraient deux véhicules : l'un, électrique, pour les petits déplacements quotidiens et l'autre, « conventionnel » (moteur à combustion interne) pour les plus longues distances. Ce qui ne serait pas sans incidences vu les pollutions associées aux phases de fabrication et de fin de vie et renforcerait encore les inégalités sociales actuellement observées en termes de motorisation des ménages.

⁴² Hubert et al., 2003 //

6 / 7 // effet de substitution

En ville, là où ils sont le plus attractifs (courtes distance et importance de la réduction des pollutions locales), les véhicules électriques risquent de capter des usagers actuels des transports en commun, de la marche et du vélo.

Le danger principal réside dans la concurrence avec les transports en commun : il serait regrettable de voir les pouvoirs publics mettre à mal, en soutenant les véhicules électriques, les services publics de transport en commun. Un tel scénario est malheureusement probable, comme en atteste la résolution du Parlement européen du 6 mai 2010 (considérant N): « *considérant que, en Europe, un grand nombre de villes et de zones urbaines densément peuplées présentent les conditions adéquates pour un lancement rapide des voitures électriques, donnant ainsi aux constructeurs européens la possibilité de devenir rapidement leaders sur le marché (...)* »

Il est dès lors utile de mettre en place les garde-fous indispensables à une telle dérive :

- soutien clair des transports en commun, y compris au niveau des infrastructures (bandes réservées) ;
- restriction de l'offre de parking ;
- outils tarifaires dissuadant l'utilisation des véhicules privés (tels la taxe de congestion londonienne) ;
- aménagements favorables aux modes doux ; etc.

6 / 8 // investissements massifs

Les constructeurs automobiles, pour qui la voiture électrique (électrique « pure » ou hybride) est une – sinon la – voie d'avenir, investissent des sommes très importantes en recherche-développement. Les Etats historiquement liés à l'industrie automobile, Japon et Etats-Unis en tête, développent également des programmes très ambitieux.

Au Japon, le Ministère de l'économie du commerce et de l'industrie (METI) a lancé en 2006 un vaste programme visant à développer et promouvoir les véhicules électriques en fixant les axes de développement nécessaires à leur démocratisation. Il s'articule en six plans fixant les objectifs et les actions à mener dans les thématiques suivantes : la diffusion des véhicules électriques (plan d'ensemble), les batteries, les métaux rares, les infrastructures, l'intégration au réseau électrique et la normalisation internationale⁴³.

Aux Etats-Unis, l'administration Obama a mis en place un certain nombre de mécanismes de financement dont le but est de rapidement faire émerger de nouvelles technologies et de positionner avantageusement les entreprises américaines sur les marchés mondiaux. A titre illustratif, le Department of Energy (DoE) a lancé le « Advanced Technology Vehicles Manufacturing Program » qui autorise 25 milliards de dollars de prêts directs (par opposition à des garanties de prêts consenties)⁴⁴.

Sans nécessairement développer d'importants programmes publics de soutien, de nombreux pays ont déjà mis en place des systèmes de primes à l'achat de véhicules électriques afin de soutenir un marché qui peine quelque peu à se développer en raison du surcoût des véhicules électriques (de l'ordre de 10.000 à 15.000€ par rapport à un véhicule thermique équivalent). Ainsi, en Belgique, pour l'année 2010, tout acheteur d'une voiture propulsée exclusivement par un moteur électrique se voit-il octroyer une réduction d'impôt équivalant à 30% du prix d'achat (plafonnée à 9.000€). De même, celui qui investit dans une borne de rechargement extérieure à son domicile a-t-il droit à une réduction d'impôt égale à 40% de la facture (plafonnée à 250€).

Et l'industrie automobile demande que les Etats fassent plus encore en développant des infrastructures de recharge de batteries afin de rendre plus attractive la mobilité individuelle électrique...

⁴³ Pluchet, 2010 //

⁴⁴ Boeken, 2010 //

Deux questions principales devraient selon nous faire l'objet d'un débat public et éclairer les pouvoirs politiques quant à la poursuite ou non du soutien public à la voiture électrique :

- les investissements publics en matière de transport de personnes doivent-ils concerner le soutien à l'automobile individuelle ou, au contraire, doivent-ils porter prioritairement sur le développement des alternatives (transports en commun, vélo, voitures partagées...)?
- les investissements publics font-ils l'objet d'évaluations objectives à l'aune de critères tels que, par exemple, le coût de la tonne de CO₂ évitée?

7 / au-delà de la voiture individuelle : le véhicule électrique

Dans sa résolution du 6 mai 2010 (point 3), le Parlement européen « souligne également qu'il convient que le développement de la mobilité électrique inclue les voitures et les vélos électriques, les tramways, les trains, etc. »

Il s'agit là d'un point crucial. Monopolisé par les constructeurs automobiles, le débat autour du véhicule électrique éclipse totalement les développements alternatifs à la voiture « classique ». Ceux-ci sont pourtant prioritaires dans le cadre de la transition vers un modèle de mobilité durable. Il s'agit :

- des systèmes de transport en commun sans énergie embarquée (trains, métros, trams, trolleys, etc) ;
- des vélos et autres véhicules de petites dimension et de faible poids. En effet, en matière d'amélioration de l'efficacité énergétique, il existe une et une seule voie royale : des véhicules plus petits, plus légers, moins puissants ; cette voie conduit également à l'amélioration de la sécurité routière et à la diminution d'autres nuisances induites par l'utilisation des véhicules motorisés individuels. Il s'agit peut-être là de l'aspect le plus intéressant de la motorisation électrique : repenser et rationaliser le véhicule motorisé individuel.

A titre illustratif, comparons le rapport entre le poids de la personne transportée et celui du véhicule (**figure 8**). Dans le cas d'un cycliste, le rapport est environ égal à 5 (75 kg de la personne divisés par les 15 kg du vélo). Dans le cas d'un automobiliste, le rapport tombe à 0,056 (le poids moyen d'une voiture neuve en Europe est de 1350 kg environ), c'est-à-dire que l'automobiliste pèse moins de 6% du poids de son véhicule. Le « rendement de chargement », défini comme le rapport entre la charge utile et la masse totale (véhicule + charge utile) permet également de bien appréhender cet aspect (**tableau 6**).

Figure 8 : Rapport entre le poids d'une personne et celui de son véhicule

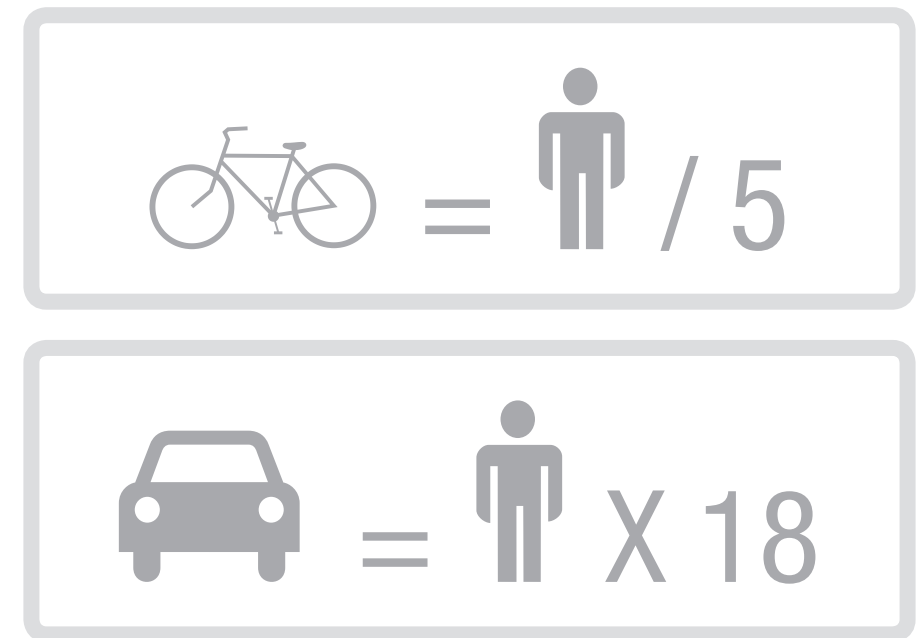


Tableau 6 : Rendements de chargement pour différents modes de transport

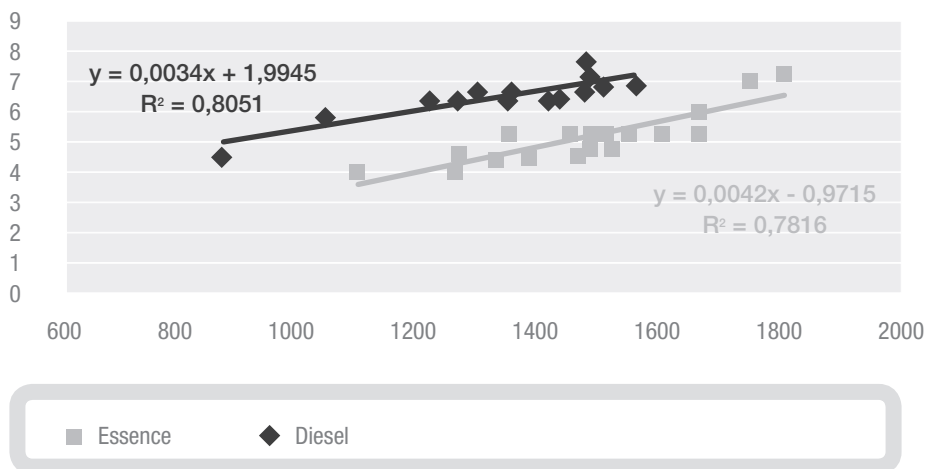
| | Poids passager(s) (kg) | Poids véhicule (kg) | Poids total (kg) | Rendement de chargement (%) |
|------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Marche | 75 | 0 | 75 | 100% |
| Vélo | 75 | 15 | 90 | 83% |
| Vélo électrique | 75 | 25 | 100 | 75% |
| Voiture à quatre | 300 | 1.350 | 1.650 | 18% |
| Voiture à deux | 150 | 1.350 | 1.500 | 10% |
| Voiture solo | 75 | 1.350 | 1.425 | 5% |

La consommation énergétique d'un véhicule est directement fonction de son poids : il s'agit là d'une notion de physique élémentaire. La **figure 9** illustre ceci dans le cas des véhicules de la gamme Peugeot.

Le poids et la consommation de carburant de la motorisation la moins puissante de chaque modèle ont été portés sur un diagramme : la relation linéaire est flagrante. Il est dès lors aisé de comprendre que si les batteries d'un vélo à assistance électrique offrent une capacité de 150 à 350 Wh, les véhicules électriques « purs » (BEV) sont eux équipés de batteries de 15 à 25 kWh.

Figure 9 : Consommation des véhicules de la gamme Peugeot

(données : Peugeot, septembre 2010, compilation des données : IEV)

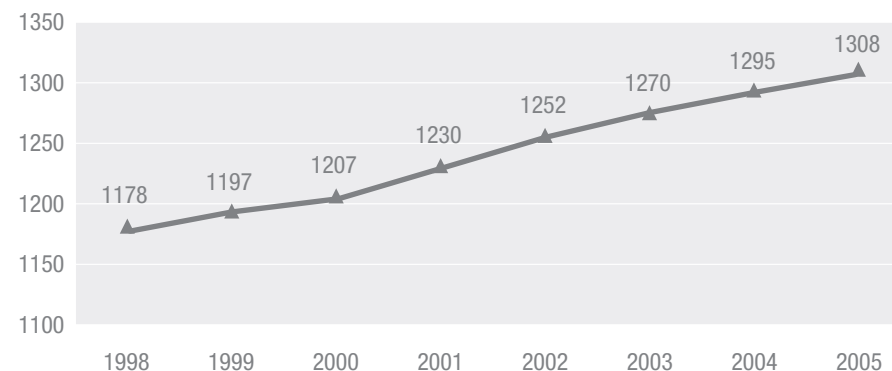


C'est malheureusement à un accroissement considérable du poids des véhicules que l'on assiste depuis des années (**figure 10**) et ce en dépit de l'utilisation croissante de matériaux plus légers, plus résistants. Au-delà de l'amélioration de la sécurité passive du véhicule (protection des occupants en cas de choc) souvent invoquée par les constructeurs, de nombreux facteurs concourent à expliquer cette évolution.

Le confort (pris au sens large) des véhicules s'est fortement amélioré ces dernières années. De plus, de nombreux équipements annexes (air conditionné ; motorisation des rétroviseurs, des vitres, etc. ; chauffage des sièges...) se sont généralisés. L'augmentation de la vitesse de pointe et du comportement dynamique (accélération) nécessitent par ailleurs, pour que soit maintenu le niveau de sécurité et de confort, une augmentation du poids...

Figure 10 : Evolution de la masse des automobiles européennes sur la période 1998-2005

(source : BRGM, 2006)



L'industrie automobile tente, avec la motorisation électrique de véhicules de toutes tailles, de maintenir le modèle qui a fait sa richesse et de substituer aux véhicules à moteur thermique des véhicules équivalents en tous points sauf au niveau du type de motorisation. Il est dès lors indispensable que les pouvoirs publics donnent les impulsions nécessaires au développement des moteurs électriques pour d'autres solutions de mobilité que la voiture particulière : transports publics de petite capacité, véhicules guidés sans stockage d'énergie à bord, vélos électriques et autres véhicules modestes.

8 / note aux pouvoirs publics

Ce chapitre qui s'appuie largement sur des éléments mis à jour tout au long de notre analyse vise à alimenter le débat politique en rappelant la nécessité d'inscrire toute réflexion sur la motorisation des véhicules dans le cadre d'une approche systémique des problèmes de mobilité. Une telle approche devrait conduire à la mise en place d'un certain nombre de conditions préalables et de garde-fous permettant que le développement des véhicules électriques soit globalement un progrès et non une régression sur le chemin d'une mobilité réellement durable.

8 / 1 // le futur désirable de la mobilité

La finalité d'un transport est d'accéder aux biens, aux lieux, aux services... Deux critères peuvent être utilisés pour qualifier un transport ou un système de transport : la **mobilité** (mesurée par le nombre de kilomètres parcourus par unité de temps) et l'**accessibilité** (mesurée par le nombre de lieux, de biens, de services auxquels on peut accéder par unité de temps).

Toutes les politiques de transport menées depuis des décennies sont fondées sur le premier critère tandis que le deuxième, que de nombreux analystes estiment pourtant plus pertinent⁴⁵, est quasi systématiquement ignoré des décideurs. Ainsi, les pratiques en matière d'aménagement du territoire (éparpillement de l'habitat, regroupement des activités dans des pôles monofonctionnels – logement, production, loisirs, commerces...) et de services à la population (regroupement des écoles et hôpitaux, suppression de bureaux de poste...) concourent-elles à une détérioration de l'accessibilité.

Une mobilité durable ne doit pas seulement minimiser les impacts environnementaux, elle doit également s'inscrire dans une logique visant à optimiser l'accessibilité de tous aux lieux et services. Elle doit en outre garantir un accès prioritaire pour certaines niches, telles les services sociaux, les services d'urgence, etc.

La rencontre de cette triple condition requiert une approche systémique qui active les trois principaux axes que sont, par ordre de priorité :

- la réduction de la demande ;
- le transfert modal ;
- l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution des pollutions spécifiques.

Dans cette optique, il est nécessaire de mettre en question le système automobile, non durable en raison de ses nombreuses incidences et ce quelle que soit la source d'énergie utilisée. Les pouvoirs publics ne peuvent plus assister en spectateurs impuissants à l'augmentation du parc automobile tout en répétant de manière incantatoire qu'il faut « décarboner » le secteur des transports. Il y a là une incompatibilité physique dont il doit être tenu compte.

Une politique des transports à la hauteur des enjeux se doit d'intégrer un ensemble de mesures ambitieuses visant *in fine* à inverser les tendances. Ce dont notre société a besoin, c'est de choix politiques courageux, affranchis de quarante années de tradition

⁴⁵ Adams J., 2000 //

de tout à la route et réorientant résolument nos politiques vers la maîtrise de la demande et le transfert vers les modes les moins polluants. C'est à ces conditions seulement que nous pourrions atteindre un modèle durable, c'est-à-dire qui permettra aux générations futures de répondre à leurs besoins de mobilité ou, plus fondamentalement, d'accessibilité.

La voiture est toutefois nécessaire, à court terme, dans nos sociétés. Les développements des dernières décennies, notamment en matière d'aménagement du territoire, ont tous pris comme hypothèse l'existence d'un important taux de motorisation de la population. Il est donc tout à fait pertinent de se poser la question de l'efficacité environnementale des voitures – et plus largement des véhicules – électriques. La voie royale en cette matière est, comme rappelé dans le chapitre qui précède, l'augmentation du ratio poids de l'occupant/poids du véhicule.

8 / 2 // un préalable : étudier le cycle de vie

En matière de véhicules électriques, beaucoup de questions demeurent encore sans réponse, notamment en termes d'impacts environnementaux et sociaux des nouvelles filières de mise à disposition de matériaux jusqu'ici utilisés en quantités faibles par rapport aux besoins probables du secteur automobile. Il apparaît dès lors indispensable de mener des études sérieuses et indépendantes sur l'analyse du cycle de vie (ACV) des véhicules et des batteries. Ceci afin d'éviter de reproduire l'erreur de la promotion des agrocarburants dont de récentes études⁴⁶ en matière de changements indirects d'affectation des sols démontrent toute la dangerosité – sans même parler des conséquences dramatiques de cette politique pour la souveraineté alimentaire de certaines populations.

L'absence de données fiables en matière d'ACV des véhicules électriques a d'ailleurs été pointée par le Parlement européen qui, dans sa résolution du 6 mai 2010 (points 21 et 22) « demande à la Commission, aux États membres et au secteur industriel de la mobilité électrique d'étudier l'impact énergétique et environnemental ainsi que l'impact en termes de ressources des véhicules électriques tout le long de leur cycle de vie, de la production à l'élimination, y compris le recyclage et la réutilisation des batteries; attire l'attention sur la disponibilité de matières premières nécessaires pour la production de batteries et d'autres composants, ce qui soulève la question des coûts de production accrus et de la dépendance de l'Union européenne en termes de matières premières; invite le secteur industriel à s'efforcer à faire une meilleure utilisation des ressources disponibles et invite la Commission à financer la recherche appliquée dans le cadre du programme-cadre actuel et à venir sur les matières premières utilisées pour les batteries électriques, à encourager une meilleure mise en réseau des études géologiques de l'Union européenne et à promouvoir les compétences et les technologies dans ce secteur, ce qui dynamisera la prospection de nouveaux gisements de matières premières ». La Commission européenne semble être d'accord sur cette nécessité de mener des études sur l'ensemble de la durée de vie des véhicules, ce qu'elle développait dans sa Communication du 28 avril 2010: « L'impact des véhicules verts équipés de technologies alternatives doit être évalué de manière approfondie et comparé avec l'impact des véhicules classiques en s'appuyant sur une approche basée sur le cycle de vie. Une telle approche considère l'impact des émissions « du puits à la roue », en tenant compte également des émissions provenant de la génération de l'électricité et des impacts environnementaux de la production et de l'élimination du véhicule. »

L'exercice a été réalisé par le Centre de recherches conjoint de la Commission européenne pour les voitures à moteur thermique. Les émissions associées à la fabrication, à la mise à disposition des pièces de rechange et au retraitement en fin de vie sont de l'ordre de 5 tonnes de CO₂, 0,9 kg de particules fines (PM_{2,5}), 700 kg de déchets...⁴⁷

46 IEEP, 2010 //

47 JRC, 2008 [2] //

Pour les gaz à effet de serre, ces émissions correspondent à celles induites par deux années d'utilisation, soit environ 30.000 kilomètres roulés; pour les particules fines, les émissions liées à la fabrication correspondent à l'utilisation d'un véhicule Euro 5 durant... 180.000 km. Un tel bilan établi dans le cas d'un véhicule à moteur électrique pourrait se révéler plus négatif encore en raison de l'impact de ses batteries, notamment en matière de déplétion des ressources naturelles. En l'absence de telles analyses, il est pour le moins délicat de poser le choix d'un soutien au développement des véhicules électriques.

8 / 3 // renouveler le parc de voitures ? Pas sans analyse coût-bénéfices

Préalablement à la mise en place de toute mesure d'aide à l'achat de véhicules automobiles (et ceci est vrai quelle que soit leur motorisation), il est nécessaire de mener des études indépendantes et objectives sur les impacts effectifs du renouvellement du parc compte tenu des différentes étapes de la vie des véhicules.

A titre illustratif, il est intéressant d'analyser les résultats du système de bonus/malus à l'achat de nouveaux véhicules mis en place en Wallonie en janvier 2008.

Pour les exercices budgétaires 2008 à 2010, ce sont plus de 147 millions d'€ qui ont été affectés à ce système de soutien au renouvellement du parc automobile. Malgré son coût élevé, le système n'a pas généré une transformation en profondeur des comportements d'achat des Wallons. Si l'on compare l'évolution des émissions moyennes des véhicules neufs des particuliers dans les trois Régions du pays en 2008 et 2009, on s'aperçoit que ces émissions ont baissé annuellement d'environ 1 gCO₂/km plus vite en Wallonie qu'en Flandre et à Bruxelles où aucun bonus ni malus n'ont été appliqués.

Un calcul mené sur les deux premières années d'application est assez illustratif. Considérant que 150.000 voitures neuves sont en moyenne achetées par an en Région wallonne, qu'une voiture roule en moyenne 15.000 km par an et que sa durée d'utilisation est d'environ 8 ans, on peut chiffrer le gain CO₂ à environ 36.000 t et à environ 2.780€ le coût de la tonne de CO₂ évitée... Pour info et comparaison, la tonne de CO₂ se négocie en cette fin 2010 à un cours oscillant autour de 13€ et n'a jamais dépassé la barre de 30€ depuis que ce marché existe!

8 / 4 // développement des services publics de transport en commun

Depuis une décennie, les sociétés de transport en commun sont l'objet d'une demande croissante de la part des citoyens. En Belgique, les trois sociétés régionales ont connu une croissance remarquable. Entre 2000 et 2008, l'évolution du nombre de voyageurs transportés a été respectivement de + 121%, + 81% et + 71% pour De Lijn, les TEC et la STIB. La SNCB n'est pas en reste avec une augmentation de + 50% en trafic intérieur sur la même période.

La distance moyenne parcourue par voyageur sur le réseau ferré passait de 45,7 km en 2005 à 44,9 km en 2008, réduction certes modeste mais attestant d'un regain d'intérêt pour le train dans les déplacements de petites distances.

La politique de libéralisation du secteur définie au niveau européen dessine un cadre dans lequel les sociétés de transport devront jouer demain le jeu de la concurrence et sont donc incitées à appliquer dès aujourd'hui toutes mesures d'amélioration de la rentabilité économique, en ce compris la réduction de l'offre sur les itinéraires ou les créneaux horaires les moins rentables.

En Belgique, le nombre de voyageurs transportés en trafic ferroviaire international (totalement libéralisé depuis 2010) a baissé de 23% entre 2000 et 2008, notamment du fait de la suppression de nombreuses liaisons internationales par trains « classiques » qui n'étaient pas économiquement rentables (tels les trains de nuit qui ne subsistent aujourd'hui que sur quelques itinéraires).

Dans ce contexte, les pouvoirs publics doivent concentrer leurs efforts pour répondre aux attentes légitimes des citoyens et assurer le redéploiement des services publics de transport en commun. Ceci suppose, entre autres, de tirer le meilleur parti du prescrit européen (notamment le règlement européen 1370/07 relatif aux obligations, contrats et compensations de service public, entré en vigueur le 03 décembre 2009) afin de sécuriser les missions de service public.

Cet aspect des politiques de mobilité est loin d'être anodin. Les budgets que les Etats consacrent à leurs politiques de transport ne sont pas extensibles. Le déploiement du transport en commun et le développement d'une politique cyclable entrent clairement en concurrence avec le soutien au secteur automobile pour la promotion de l'électromobilité (primes à l'achat de véhicules, budgets de recherche-développement, investissements dans des infrastructures de charge de batteries, etc.).

8 / 5 // priorité aux marchés de niche à vocation sociale et flottes captives

Face au défi énergétique, il est nécessaire de pérenniser les transports à utilité sociale (ambulances, fourniture des pharmacies, transport en commun de petites capacités, distribution de courrier...). C'est vers ces « niches » que devrait se porter en priorité l'effort de conversion des motorisations thermiques vers les motorisations électriques, dans une logique de transition vers un modèle de mobilité durable. Une telle approche visant prioritairement des flottes captives ne requérant pas une couverture totale du territoire (gestion « centralisée », itinéraires connus) permet aussi de minimiser les coûts associés au développement des infrastructures de recharge.

8 / 6 // production et consommation électriques : renforcer le renouvelable

Afin d'assurer que les réductions d'émissions de CO₂ induites par les véhicules électriques soient bien effectives et optimales, il est nécessaire de « décarboner » la production d'électricité, ceci sans favoriser le développement de l'énergie nucléaire dont les incidences environnementales et sociales – potentiellement catastrophiques – ne sont plus à démontrer.

Selon l'analyse du consultant CE Delft, « en l'absence d'incitants nouveaux, la demande additionnelle en électricité associée aux véhicules électriques ne sera pas automatiquement couverte par les sources d'énergie renouvelables et la majeure partie de l'électricité sera fournie par les centrales conventionnelles »⁴⁸.

La Directive européenne RED (Renewable Energy Directive, 2009/28/EC) définit, à l'horizon 2020, quelle devra être la part d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale brute. Cette part est de 13% pour la Belgique et de 20% en moyenne pour l'Union européenne. Le processus législatif qui a conduit à cette Directive s'est déroulé dans un contexte où la structure de la consommation d'électricité n'incluait qu'une faible part destinée au secteur des transports (principalement la traction ferroviaire). Une percée du véhicule électrique pourrait venir modifier sensiblement cette structure tout en augmentant la consommation finale d'énergie. Il semble dès lors nécessaire de s'interroger sur la manière de prendre en compte une telle évolution. Une voie consisterait à établir une majoration des objectifs de production d'énergie renouvelable de la directive RED à hauteur de la surconsommation induite par les véhicules électriques.

Par ailleurs, afin que chacun puisse maîtriser ses consommations, il est nécessaire de mettre au point des standards techniques en matière de *smart meters* (compteurs intelligents). Ceux-ci, qui devraient équiper les véhicules électriques au plus tôt, pourraient « dialoguer » avec le réseau électrique. De même que toutes les voitures vendues actuellement doivent être équipées d'un compteur qui totalise les kilomètres roulés, chaque véhicule électrique devrait être équipé d'un compteur « intelligent » indiquant combien d'électricité a été consommée et, mieux encore, si cette électricité vient d'une source renouvelable ou non.

Il faudrait, complémentirement, déterminer une tarification de l'électricité utilisée à des fins de mobilité. Une solution réside dans un péage en fonction du nombre de kilomètres parcourus. Une autre solution consiste à utiliser les données collectées par les *smart meters*.

48 CE Delft, 2010 //

8 / 7 // la normalisation, un outil précieux

Il est urgent de cadrer les développements actuels et la guerre aux standards en édictant des normes énergétiques et environnementales pour les véhicules et pour la production d'électricité. Le secteur industriel en est bien conscient, de même que le monde politique. Ainsi, dans sa résolution du 6 mai 2010 relative aux véhicules électriques, le Parlement européen invitait-il (point 4) la Commission et le Conseil à « agir conjointement en matière de standardisation, internationale si possible, ou au moins européenne, des infrastructures et des technologies de rechargement, y compris pour les réseaux intelligents, de normes de communication ouverte, de technologies de mesure embarquées et d'interopérabilité. »

La normalisation doit être mobilisée bien au-delà de ces seuls aspects. C'est en effet l'unique outil de pilotage public qui permette d'agir directement sur les filières de production des véhicules afin que soient respectées, à terme, les deux conditions de durabilité identifiées par l'OCDE : une consommation des ressources renouvelables à un rythme inférieur à leur vitesse de régénération et une consommation de ressources non-renouvelables à un rythme inférieur à celui de développement des produits renouvelables de remplacement.

La normalisation, enfin, pourrait mettre un terme à la surenchère en matière de poids, vitesse maximale et puissance des véhicules (la puissance moyenne des véhicules neufs vendus en Europe des 15 a augmenté de 37% entre 1994 et 2007, passant de 64 à 86 kW)⁴⁹. Outre les impacts positifs sur le plan environnemental, une limitation de la vitesse maximale et de la masse des véhicules engendreraient d'énormes bénéfices sur le plan de la sécurité routière.

A ce sujet, il est utile de rappeler que, de longue date, les assureurs et les experts en accidents ont produit des travaux précis quantifiant les risques relatifs en fonction des masses, lesquels sont la conséquence directe de lois élémentaires de la physique. En cas de collision entre des véhicules de masses différentes, les occupants du véhicule le plus léger subiront des variations de vitesse et des pics de décélération plus élevés que ceux du véhicule le plus lourd et, partant, des dommages corporels plus graves⁵⁰. Par ailleurs, la gravité des accidents est également directement corrélée à la vitesse du ou des véhicules impliqué(s). On peut d'ailleurs légitimement s'offusquer du fait que, à quelques rares exceptions près, toutes les voitures neuves offrent des vitesses de pointe supérieures à 150 km/h et d'impressionnantes capacités d'accélération dont même les conducteurs les plus prudents sont tentés de faire usage, au mépris des règles élémentaires de sécurité et de respect des autres usagers de la route.

49 ACEA, 2010 //

50 Got, 2008 //

8 / 8 // législation à revoir pour éviter les effets pervers

Le Règlement européen 443/2009 qui établit les objectifs de réduction des émissions de CO₂ des voitures neuves permet aux constructeurs d'utiliser les voitures électriques pour continuer à produire des véhicules gros consommateurs de carburant – et partant gros émetteurs de CO₂. Le système de « bonifications » permet ainsi aux constructeurs de vendre 3,5 véhicules polluants pour chaque véhicule électrique vendu sans que soit affecté le bilan global calculé sur tous les véhicules vendus par le constructeur. En effet, selon l'article 5 du Règlement, chaque voiture particulière neuve dont les émissions spécifiques de CO₂ sont inférieures à 50 g/km, compte pour 3,5 véhicules. Fort heureusement, les bonifications sont dégressives : d'un facteur 3,5 en 2012 et 2013, on passera à 2,5 en 2014 puis 1,5 en 2015 avant de retomber à 1 à partir de 2016. Il n'empêche que pour les années concernées ce système pourrait mener à une augmentation de la consommation de pétrole et des émissions de CO₂ du secteur. Un comble alors qu'il vise à faire décroître ces émissions ! Une révision du Règlement européen apparaît donc requise d'urgence pour le rendre plus ambitieux et compatible avec les objectifs européens de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les émissions de CO₂ associées à l'électricité consommée par les véhicules électriques est indirectement couverte par le système d'échange de quotas d'émissions européens (ETS pour *Emission Trading Scheme*). Tout accroissement des émissions du secteur de l'énergie devra en effet être compensé par des réductions dans d'autres secteurs afin que soit respecté l'objectif de réduction global. Dans la pratique, cela pourrait ne pas être le cas et ce pour deux raisons.

Tout d'abord, une part non négligeable des réductions pourrait être réalisée par le biais des mécanismes dits de « développement propre » par lesquels des réductions d'émissions sont financées dans des pays en développement (il s'agit de financer un développement qui induit des réductions d'émissions par rapport à un scénario dans lequel cette intervention ne se ferait pas – ou peut-être pas). Ensuite, l'objectif de réduction du système ETS est fixé jusqu'en 2020 et doit être renégocié pour la suite. Sans présager des résultats du processus de négociation qui sera mené, la demande additionnelle des véhicules électriques pourrait jouer un rôle dans l'affaiblissement des objectifs futurs.

conclusion

Le système de mobilité qui s'est développé dans les sociétés occidentales n'est pas durable : ses incidences négatives sont nombreuses sur les plans environnemental, social et économique. Il est dès lors indispensable de repenser fondamentalement notre mobilité et d'adopter une approche systémique qui mobilise les trois axes principaux que sont, par ordre de priorité, 1. la réduction de la demande de transport, 2. le transfert vers les modes moins polluants et 3. l'amélioration de l'efficacité énergétique et la diminution des pollutions spécifiques des véhicules.

Le développement des véhicules électriques s'inscrit dans ce troisième axe. Il offre l'opportunité de repenser la mobilité en développant des alternatives légères (vélo à assistance électrique et autres) à la voiture individuelle. En matière de transport en commun, c'est le véhicule électrique sans stockage de l'énergie à bord (train, tram, trolley, métro) qui offre la meilleure efficacité énergétique et induit les pollutions les plus faibles.

La voiture électrique proposée par les constructeurs automobiles offre une réponse partielle à deux des nombreuses incidences induites par le système de mobilité actuel : les émissions de polluants locaux (y compris le bruit) et, dans une moindre mesure, les émissions de CO₂. Solution technique géniale, ayant toute sa pertinence à l'échelle individuelle, elle constitue *de facto* la parfaite illustration de ce que les anglophones appellent « *too much of a good thing* » : trop d'une bonne chose.

Le développement à grande échelle de la voiture électrique présente en effet plusieurs dangers. Le principal, qui est peut-être aussi le moins débattu, réside dans le risque de maintenir l'illusion que le système automobile actuel est pérenne, alors que ses incidences vont bien au-delà des seuls aspects auxquels la voiture électrique apporte une réponse.

Les autres dangers sont plus spécifiques et concernent principalement la disponibilité des matières premières, les incidences sociales et environnementales associées à leur exploitation, l'augmentation probable du parc automobile, la réponse qui sera apportée à l'accroissement de la demande d'énergie électrique.

Afin de profiter pleinement des avantages potentiels de la motorisation électrique des véhicules tout en évitant les écueils associés, il convient que les pouvoirs publics « prennent la main » et mettent en place une série d'actions visant à :

- étudier, préalablement à tout programme de développement, le cycle de vie des véhicules, en ce compris les batteries afin d'éviter de reproduire le scénario des agrocarburants, fausse bonne solution dont les incidences négatives, récemment révélées, amènent les pouvoirs politiques à devoir freiner sinon stopper une machine emballée qu'ils ont eux-mêmes prématurément mise en marche ;
- définir une vision de la mobilité durable à l'horizon 2050 et les politiques de transition nécessaires en intégrant l'objectif d'une diminution de la demande de transport en lien avec les autres politiques publiques (en particulier l'aménagement du territoire) ;
- amplifier les politiques de déploiement des services publics de transport en commun et des modes doux (vélo, marche...);
- analyser le coût et les bénéfices des politiques de soutien à l'industrie automobile, notamment pour le développement de la filière électrique ;
- réserver les voitures électriques aux marchés de niche à vocation sociale (par exemple les services de secours) et les flottes captives (par exemple celles des sociétés de livraison de médicaments) ;
- favoriser l'application des motorisations électriques aux véhicules légers, dont les vélos électriques ;
- mettre en place de nouvelles normes pour l'automobile, notamment en matière de durabilité de la production et de vitesse maximale des véhicules ;
- renforcer les objectifs de production d'énergie renouvelable afin de satisfaire la demande additionnelle générée par les véhicules électriques.

liste des acronymes & abréviations utilisés

ACEA: Association des constructeurs européens d'automobiles

APERe: Agence de promotion des énergies renouvelables

AVERE: Association européenne pour les véhicules électriques à batterie, hybrides et à pile à combustible

BBL: Bond Beter Leefmilieu (Fédération d'associations d'environnement en Région flamande)

BEV: Battery Electric Vehicle (véhicule électrique à batterie), par opposition aux véhicules hybrides (HEV)

BRGM: Bureau de recherches géologiques et minières

CCFA: Comité des constructeurs français d'automobiles

CE: Commission européenne

CES: Comité économique et social européen

CPDT: Conférence permanente du développement territorial

CREG: Commission de régulation de l'électricité et du gaz

EEB: European Environmental Bureau (Bureau européen de l'environnement ou BEE)

EUCAR: European Council For Automotive R&D

FEBIAC: Fédération belge de l'industrie automobile et du cycle

HEV: Hybrid Electric Vehicle (véhicule électrique hybride)

IEA: International Energy Agency (agence internationale à l'énergie)

IEEP: Institute for European Environmental Policy

IFP: Institut français du pétrole (devenu depuis juillet 2010 IFP Energies nouvelles)

JRC: Joint Research Center
(Centre de recherches conjoint de la Commission européenne)

PE: Parlement européen

PWC: Price Waterhouse Coopers

T&E: European Federation for Transport and Environment

TTW: Tank To Wheel (du réservoir à la roue)

V2G: Vehicle To Grid (du véhicule au réseau)

WTT: Well To Tank (du puits au réservoir)

WTW: Well To Wheel (du puits à la roue)

WWF: World Wide Fund for Nature

bibliographie

- ACEA: New passenger car registrations – Breakdown by specification, October 2010
- Adams J.: The social implications of hypermobility, in OECD, project on environmentally sustainable transport, Proceedings from the Ottawa workshop, 2000
- AFP: La Chine réduit son offre de terres rares pour protéger ses intérêts, Dépêche du 24 octobre 2010
- APERe: Charte pour une énergie durable, 2010
- AVERE [1]: Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicles are the keys to a sustainable mobility, Bruxelles, mars 2007
- AVERE [2]: Nombre de véhicules électriques sur les routes en Europe, Feuille de calcul, Juin 2005
- Axion: Our guide to batteries, 2010
- BBL: Uitdagingen voor elektrische mobiliteit, Brussel, September 2010
- Birdlife International, EEB and T&E: Bioenergy: a carbon accounting time bomb, June 2010
- Boeten T. et al.: Batteries du futur pour véhicules électriques, Ambassade de France à Washington, Octobre 2010
- BRGM: Ressources minérales, exportations chinoises: automobile, la prochaine étape, Octobre 2006
- CCFA: Immatriculations de voitures neuves par pays, Feuille d'information, 2010
- CE [1]: Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil et au Comité économique et social européen, Une stratégie européenne pour des véhicules propres et économes en énergie, COM(2010)186 final, Bruxelles, Avril 2010
- CE [2]: Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, 23 avril 2009
- CE Delft: Green power for electric cars – development of policy recommendations to harvest the potential of electric vehicles, January 2010.
- Cellule Etat de l'Environnement wallon: Tableau de bord de l'environnement wallon 2003, Ed. MRW-DGRNE
- CES: Vers une large pénétration des véhicules électriques, Avis exploratoire à la demande de la présidence belge de l'Union, Bruxelles, 14 juillet 2010
- Commission nationale climat: Cinquième communication nationale de la Belgique à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, Service Public Fédéral Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement, décembre 2009
- CPDT: Les coûts de la désurbanisation, Etudes et documents, Liège, 2000
- CREG: Avis relatif à l'étude 929 relative à l'impact possible de la voiture électrique sur le système électrique belge, Juillet 2010
- Element Energy Limited: Electric vehicles in Scotland: Emission reductions and Infrastructure needs, study for WWF Scotland, Final Report, November 2009
- EUCAR: The electrification of the vehicle and the urban transport system, Recommendations on key R&D by the European Automotive Manufacturers, July 2009
- European Association for Battery Electric Vehicles: Consommation énergétique et émissions de CO₂ générées par les Véhicules Electriques – Comparaison avec les véhicules à carburant, Novembre 2008

- FEBIAC: Code en matière de publicité pour les véhicules automobiles ainsi que leurs composants et accessoires, 2008
- Got C.: Analyse du projet de l'Union visant à limiter à 130 g/km en 2012 l'émission moyenne de dioxyde de carbone par les voitures particulières, février 2008
- Hubert, J.-P. et al.: La mobilité quotidienne des Belges, Namur, 2002
- IEA: World energy outlook 2007
- IEEP: Anticipated indirect land use change associated with expanded use of biofuels and biofuels in the EU – An Analysis of the National Renewable Energy Action Plans, November 2010
- IFP: Li, Ni, Pt, Pd: des métaux « critiques »?, Panorama 2010
- INFRAS / IWW: External costs of transport, Update study, October 2004
- Itinera Institute [1]: Industrieel beleid voor de groene auto; opportuniteit of welvaartsverlies?, Memo, Avril 2010
- Itinera Institute [2]: De groene auto rijdt op emoties. Hoe economisch rationeel is het om te investeren in ultrazuinige auto's?, Octobre 2010
- JRC [1]: Environmental improvement of passenger cars, European Commission, 2008
- JRC [2]: Biofuels in the European context: facts and uncertainties, European Commission, 2008
- Kendall G.: Plugged In, The End of the Oil Age, WWF, 2008
- Matheys J. et al.: SUBAT: sustainable batteries, Work package 5: Overall Assessment, Final Public Report, Vrije Universiteit Brussel, 2005
- Meridian International Research: The trouble with lithium 2, Under the microscope, May 2008
- Michelin: Michelin Active Wheel, Dossier de presse, Mondial de l'Auto 2008, Paris, Octobre 2008
- Nzisabira J.: Intégration de l'écoefficient dans la conception préliminaire des véhicules propres: une approche basée sur l'optimisation multidisciplinaire, Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en science de l'ingénieur, Université de Liège, 2009
- OCDE: Project on environmentally sustainable transport (EST), Février 2002
- Odru P. (dir.): Le stockage de l'énergie, Dunod, Paris, 2010
- PE: Résolution du parlement européen sur les voitures électriques, 6 mai 2010
- Perrin J.: Rouler Electriquement et Ecologiquement: Bilans énergétiques et émissions « du puits à la roue » – Analyse du cycle de vie et feuilles de route technologiques, Présentation, Renault, Paris, Décembre 2008
- Peugeot: Liste de prix Belgique, Septembre 2010
- Pluchet J. et al.: Etat de la R&D dans le domaine des batteries pour véhicules électriques au Japon, Ambassade de France au Japon, Octobre 2010
- PWC: Les émissions de CO₂ des principaux électriciens européens ont augmenté en 2006, Communiqué de Presse, Paris, 26 novembre 2007
- Recupyl: site internet, 2010
- Rencontres Scientifiques Colas: « L'avenir du véhicule électrique », 2 juin 2009, avec Yves Chabre Docteur ès-Sciences, Consultant pour véhicules électriques et Pierre Midrouillet, Directeur Général de PVI (Constructeur de véhicules industriels électriques), Conférence modérée par Mathieu Nowak, Journaliste à La Recherche
- Sandy A: Etude de faisabilité et optimisation préliminaire d'un système de récupération d'énergie au freinage: comparaison entre supercapacités et batteries de nouvelle génération, Travail de fin d'études, Université de Liège, 2010
- Sanders A.: Mitsubishi i-MiEV technical highlights, April 2010
- Steffens C. [1]: Comparaison de la consommation énergétique et des émissions de CO₂ des véhicules thermiques et électriques, Note de calcul, Juin 2010
- Steffens C. [2]: Communication personnelle, Novembre 2010
- Syrota J.: Perspectives concernant le véhicule « grand public » d'ici 2030, Centre d'analyse stratégique du Gouvernement français, Paris, Septembre 2008
- T&E: How to avoid an electric shock: electric cars, from hype to reality, Brussels, November 2009
- Walckiers J.: Trajets domicile/école: un enjeu de société, lettre électronique de la fédération Inter-Environnement Wallonie, 16 septembre 2010

- Wells P. et al. : Lowering the bar : Options for the automotive industry to achieve 80 g/km CO₂ by 2020 in Europe, Cardiff University, study for Greenpeace International, May 2010
- Xhonneux V. : Sources et impacts sanitaires du bruit lié aux transports, Fédération Inter-Environnement Wallonie, Septembre 2010

annexe

rendements énergétiques et émissions de CO₂ des filières thermique et électrique

Hypothèses :

- Mix européen de production d'électricité
- Pas de pertes de transmission dans le véhicule électrique
- Rendements moteurs : meilleure technologie disponible pour les deux filières
- Rendement énergétiques des batteries : valeur en conditions d'utilisation réelles pour une batterie neuve

Données

Source : Joint Research Center (JRC), Commission européenne

| | |
|---|-------|
| Contenu énergétique essence (kwh/l) | 8,94 |
| Mix européen d'électricité (gCO ₂ /kWh) | 465 |
| Emissions CO ₂ production essence (kgCO ₂ /l) | 0,402 |
| Rendement mix européen électricité (%) | 35 |
| Contenu énergétique diesel (kwh/l) | 9,96 |
| Emissions CO ₂ production diesel (kgCO ₂ /l) | 0,509 |
| Rendement EU production carburant (%) | 87 |

Véhicule thermique (ICE)

| | |
|--|------|
| Utilisation | |
| Energie à l'essieu (kWh/100 km) | 10 |
| ηtransmission (%) | 95% |
| ηmoteur (%) (essence) | 22% |
| ηmoteur (%) (diesel) | 27% |
| ηtotal (%) (essence) | 21% |
| ηtotal (%) (diesel) | 26% |
| Energie entrée moteur (kWh/100 km) (essence) | 47,8 |
| Energie entrée moteur (kWh/100 km) (diesel) | 39,0 |
| Carburant (essence) (l/100 km) | 5,4 |
| Carburant (diesel) (l/100 km) | 3,9 |
| CO ₂ essence (g/km) | 126 |
| CO ₂ diesel (g/km) | 103 |
| Extraction – transformation – distribution énergie | |
| ηTotal (%) | 87% |
| Energie primaire (kWh/100 km) (essence) | 55,0 |
| Energie primaire (kWh/100 km) (diesel) | 44,8 |

| | |
|------------------------------|--------------|
| ηTotal filière (%) (essence) | 18,2% |
| ηTotal filière (%) (diesel) | 22,3% |

| | |
|--|-----|
| CO ₂ production essence (g/km) | 22 |
| CO ₂ production diesel (g/km) | 20 |
| CO ₂ total filière (g/km) (essence) | 148 |
| CO ₂ total filière (g/km) (diesel) | 123 |

Véhicule électrique (EV)

| | |
|--|------|
| Utilisation | |
| Energie à l'essieu (kWh/100 km) | 10 |
| ηtransmission (%) | 98% |
| ηmoteur (%) | 90% |
| ηélectronique (SMPS) (%) | 90% |
| ηbatterie (%) | 75% |
| ηtotal (%) | 60% |
| Energie entrée moteur (kWh/100 km) | 16,8 |
| CO ₂ utilisation (g/100 km) | 0 |
| Distribution énergie | |
| ηdistribution (%) | 90% |
| Energie entrée réseau (kWh/100 km) | 18,7 |

| | |
|-------------------------------------|--------------|
| Extraction – transformation énergie | |
| ηTotal mix EU (%) | 35% |
| Energie primaire (kWh/100 km) | 53,3 |
| ηTotal filière (%) | 18,8% |

| | |
|--------------------------------------|----|
| CO ₂ total filière (g/km) | 87 |
|--------------------------------------|----|

Mise au point il y a largement plus d'un siècle (en 1881 très précisément), la voiture électrique connut une gloire éphémère au début du XX^{ème} siècle avant un déclin inexorable qui conduit à sa disparition au tournant des années 30. Mais, 80 ans plus tard, l'heure de la revanche semble avoir sonné: cette technique fait aujourd'hui l'objet d'un engouement généralisé. C'est que les problématiques conjuguées de l'épuisement des réserves pétrolières et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre en font pour l'heure la seule alternative crédible à la voiture thermique et donc la seule voie offerte à la pérennisation de la voiture individuelle.

Ne boudons pas notre plaisir: le véhicule électrique présente indéniablement des avantages. Pas d'émissions locales de polluants qui affectent la santé humaine. Pas de bruit aux vitesses faibles. Une réduction non négligeable des émissions de gaz à effet de serre. Une compatibilité avec toutes les sources d'énergie primaire.

Mais il faut également garder la tête froide: la voiture électrique reste avant tout une voiture et n'apporte aucune réponse à la plupart des incidences néfastes d'un système de mobilité centré sur la voiture individuelle (accidents, encombrement de l'espace public, sédentarisation, épuisement de ressources naturelles, déchets, impacts des infrastructures sur la biodiversité, iniquité sociale...). De plus, si elle apporte un élément de réponse à la raréfaction des réserves de pétrole, elle engendre une nouvelle forme de dépendance à d'autres matières premières au premier rang desquelles le lithium dont l'exploitation à grande échelle des réserves de lithium pose de nombreuses questions (enjeux géostratégiques, impacts sur les populations locales et les écosystèmes) totalement négligées. L'augmentation de la demande d'énergie électrique et la manière dont l'offre y répondra constituent d'autres enjeux occultés.

Approche systémique et analyse des aspects techniques ont été les deux fils conducteurs dans la rédaction du présent dossier. Puisse le lecteur y trouver les éléments de réponse à des questions qui ne sont que trop rarement posées...