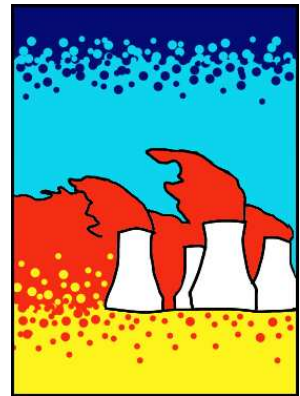


Deuxième partie

Faire la différence



20 De meilleurs transports

La technologie des véhicules modernes permet de réduire les émissions liées au changement climatique sans changer l'apparence, le ressenti, ou les performances auxquels les gens ont fini par s'attendre.

Bureau de l'air de Californie (*California Air Resources Board*)

Environ un tiers de notre énergie part dans les transports. La *technologie* peut-elle nous permettre de réduire cette consommation ? Dans ce chapitre, nous allons explorer diverses possibilités pour atteindre deux objectifs : obtenir la plus grande réduction possible de la consommation d'énergie dans les transports, *et* éliminer l'utilisation des combustibles fossiles dans ces mêmes transports.

Les transports figuraient dans trois de nos chapitres sur la consommation : le chapitre 3 (voitures), le chapitre 5 (avions) et le chapitre 15 (fret routier et maritime). Il y a donc deux types de transports dont il faut s'occuper : le transport de passagers et le transport de fret. Notre unité de transport de passagers est le passager-kilomètre (p-km). Si une voiture transporte une personne sur une distance de 100 km, elle fournit 100 p-km de transport. Si elle transporte quatre personnes sur la même distance, elle aura fourni 400 p-km. De la même manière, notre unité de transport de marchandises est la tonne-kilomètre (t-km). Si un camion transporte 5 tonnes de fret sur une distance de 100 km, il fournit 500 t-km de transport de fret. Nous allons mesurer la consommation énergétique de transport de passagers en « kWh pour 100 passagers-kilomètres », et la consommation d'énergie du transport de fret en « kWh par tonne-km ». Notez que ces unités de mesure ont le même objet que l'unité de consommation classique des voitures, les « litres aux 100 kilomètres » : on veut *réduire* autant que possible le nombre de kWh pour 100 p-km.

Nous allons commencer ce chapitre en décrivant comment réduire la consommation d'énergie du transport de surface. Pour comprendre comment la réduire, il nous faut comprendre où part l'énergie dans ces transports. Voici les trois concepts-clés qui sont plus amplement expliqués dans le chapitre technique A.

1. Pour les *déplacements sur de courtes distances* avec de nombreux arrêts et redémarrages, l'essentiel de l'énergie est consommée pour accélérer le véhicule et ce qu'il contient. Les stratégies-clés pour consommer moins dans ce genre de mode de transport sont donc d'*alléger*, et de *rallonger la distance entre deux arrêts*. La récupération d'énergie au freinage, pour la réutiliser lors d'une accélération à venir, peut également être d'une aide appréciable. Enfin, cela facilite les choses d'*aller moins vite*, et de *moins se déplacer*.
2. Dans les *déplacements sur de longues distances* à vitesse constante, en train ou en voiture, l'essentiel de l'énergie est dépensée pour pro-



FIGURE 20.1. Le point de départ de ce chapitre : un tracteur urbain de luxe. La voiture britannique moyenne a une consommation de carburant de 8,5 litres pour 100 km, ce qui correspond à une consommation d'énergie de 80 kWh pour 100 km. Est-ce que l'on peut faire mieux ?

voquer un tourbillon d'air autour du véhicule, car il n'y a eu besoin d'accélérer celui-ci qu'une seule fois. Les stratégies-clés pour consommer moins dans ce genre de mode de transport sont donc d'*aller moins vite*, de *moins se déplacer* et d'*utiliser des véhicules longs et fins*.

3. Dans toutes les formes de déplacements, il y a une chaîne de conversion de l'énergie, qui puise de l'énergie sous la forme d'un carburant quelconque, et en utilise une partie pour faire avancer le véhicule. Inévitablement, cette chaîne de conversion énergétique a des inefficacités. Dans une voiture standard brûlant des combustibles fossiles, par exemple, seuls 25 % servent à faire avancer le véhicule, et à peu près 75 % de l'énergie sont perdus en faisant chauffer le moteur et le radiateur. Une dernière stratégie pour consommer moins d'énergie est donc de rendre la chaîne de conversion d'énergie plus efficace.

Ces constats nous amènent à énoncer six principes de conception et d'utilisation des véhicules pour un transport plus efficace en énergie : *a)* réduire la surface frontale par personne ; *b)* réduire le poids du véhicule par personne ; *c)* en voyageant, avancer à une vitesse aussi constante que possible, et éviter d'utiliser les freins ; *d)* se déplacer moins vite ; *e)* moins se déplacer ; et *f)* rendre la chaîne énergétique plus efficace. Nous allons maintenant parler de diverses manières d'appliquer ces principes.

Comment faire pour mieux rouler

Il y a une statistique souvent citée qui dit entre les lignes que « seulement 1 pour cent de l'énergie utilisée par une voiture sert à déplacer son conducteur » — implicitement, cela voudrait dire, sans doute, qu'en étant un peu plus malin, on pourrait fabriquer des voitures 100 fois plus efficaces ? La réponse est oui, ou presque, mais à condition d'appliquer les principes de conception et d'utilisation des véhicules listés ci-dessus à l'*extrême*.

Une des illustrations possibles de conception extrême de véhicules est une éco-voiture, qui a une petite surface frontale, un faible poids, et — s'il y a des records à battre — se conduit prudemment, à vitesse faible et constante. Avec un seul litre d'essence, l'éco-voiture *Team Crocodile* (figure 20.2) peut rouler 773 kilomètres à une vitesse de 24 km/h — soit une consommation inférieure à 0,11 litre aux 100 km, ou 1,3 kWh pour 100 km ; c'est 60 fois moins que le tracteur urbain de la figure 20.1. Pesant 50 kg, encore moins haute qu'un cône de signalisation orange et blanc, elle peut confortablement loger un conducteur adolescent.

Mmmh. A mon avis, il est possible que le conducteur du tracteur urbain de la figure 20.1 puisse détecter un petit changement dans « l'apparence, le ressenti et la performance » de son véhicule, si l'on remplaçait son tracteur par cette éco-voiture, et si on lui intimait l'ordre de ne jamais



FIGURE 20.2. L'éco-voiture Team Crocodile consomme 1,3 kWh pour 100 km. Photo gracieusement fournie par Team Crocodile. www.teamcrocodile.com

dépasser 25 km/h. OK, donc l'idée que les voitures pourraient facilement être 100 fois plus efficaces en énergie est une légende. Nous reviendrons dans un instant sur le défi que constitue la fabrication de voitures plus économes en énergie. Mais d'abord, voyons quelques autres manières de satisfaire les principes du transport de surface plus efficace en énergie.

La figure 20.3 montre un véhicule à plusieurs passagers qui est au moins 25 fois plus économe en énergie qu'une voiture à essence standard : un vélo. La performance du vélo (en termes d'énergie requise par unité de distance parcourue) est à peu près la même que celle de l'éco-voiture. Sa vitesse est la même, son poids est inférieur à celui de l'éco-voiture (parce que l'être humain remplace le réservoir de carburant et le moteur), mais sa surface frontale effective est plus grande, parce que le cycliste n'est pas aussi aérodynamique que l'éco-voiture.

La figure 20.4 montre une autre possibilité pour remplacer la voiture à essence : un train qui, à pleine charge, a un coût énergétique de **1,6 kWh pour 100 p-km**. Contrairement à l'éco-voiture et au vélo, le train arrive à atteindre une efficacité remarquable, sans devoir se déplacer lentement, et sans avoir un faible poids par personne. Le train compense sa grande vitesse et sa lourde structure en exploitant le principe d'une faible surface frontale par personne. Alors qu'un cycliste ou une voiture classique ont des surfaces frontales respectives d'environ 0,8 m² et 0,5 m², le train de banlieue plein qui rejoint Cambridge à Londres a une surface frontale par passager inférieure à 0,02 m².

Houlà, mais on s'embarque dans un sujet horrible, là — l'idée que l'on puisse partager un véhicule avec « tous ces gens épouvantables ». Hé bien, mettons les pieds dans le plat, et posons clairement la question : « jusqu'à quel point pourrait-on réduire la consommation d'énergie en passant de véhicules individuels très énergivores à un excellent système de transport public intégré ? »

Les transports publics

Lorsqu'il est utilisé au mieux, le transport public partagé est de très loin plus efficace en énergie que la voiture individuelle. Un **car** à moteur Diesel, transportant 49 passagers et consommant 28 litres aux 100 km à 100 km/h, ingurgite un peu moins de **6 kWh pour 100 p-km** — 13 fois moins qu'une voiture avec une seule personne à bord. Le **trolleybus** de Vancouver consomme 270 kWh pour 100 véhicules-km, avec une vitesse moyenne de 15 km/h. Si le trolleybus contient 40 passagers à son bord, son coût de transport de passagers est de **7 kWh pour 100 p-km**. Le **Bateau-Bus** de Vancouver a un coût de transport de 83 kWh par véhicule-km à une vitesse de 13,5 km/h. Il peut accueillir 400 personnes, donc son coût de transport de voyageurs à plein est de **21 kWh pour 100 p-km**. Le **métro** de Londres, en heure de pointe, consomme **4,4 kWh pour 100 p-km** — 18 fois moins que la voiture individuelle. Même les **trains à grande vitesse**, qui



FIGURE 20.3. « Bébés à bord ». Ce mode de transport a un coût énergétique de **1 kWh pour 100 p-km**.



FIGURE 20.4. Ce train à 8 voitures, lancé à sa vitesse maximum de 160 km/h, consomme **1,6 kWh pour 100 passager-km**, lorsqu'il est plein.



4,4 kWh pour 100 p-km, si plein



3 à 9 kWh pour 100 places-km, si plein



7 kWh pour 100 p-km, si plein



21 kWh pour 100 p-km, si plein

FIGURE 20.5. Quelques transports publics, et leur efficacité en énergie dans le meilleur cas de figure (si toutes les places sont occupées). Le métro (extérieur et intérieur). Deux trains à grande vitesse : l'un, électrique, consomme 3 kWh pour 100 places-km ; l'autre, Diesel, 9 kWh pour 100 places-km. Trolleybus à San Francisco. Le bateau-bus à Vancouver. Photo par Larry.

violent deux de nos principes d'économies d'énergie, puisqu'ils vont deux fois plus vite qu'une voiture et qu'ils sont très lourds, sont malgré tout beaucoup plus économes en énergie : lorsque le train électrique à grande vitesse est plein, son coût énergétique est de 3 kWh pour 100 p-km — c'est 27 fois moins que pour la voiture !

Cependant, il faut être réaliste en établissant nos plans. Les trains, les bus et les cars ne sont pas toujours pleins (figure 20.6). Le coût énergétique *moyen* du transport public est donc plus important que les chiffres précédemment mentionnés, qui décrivent le meilleur des cas. Quelle est alors la consommation *moyenne* d'énergie des systèmes de transport public, et quelle évaluation réaliste peut être faite de leur performance en la matière ?

En 2006–2007, le coût énergétique total de toutes les installations de métro de Londres, y compris l'éclairage, les ascenseurs, les entrepôts et les ateliers, était de 15 kWh pour 100 p-km — cinq fois mieux que notre voiture de base. En 2006–2007, le coût énergétique de tous les autobus de Londres était de 32 kWh pour 100 p-km. Tout ne se résume pas au coût énergétique, évidemment. Les passagers se soucient aussi de la vitesse : les rames de métro roulent à des vitesses plus élevées (en moyenne 33 km/h) que les autobus (18 km/h). Les gestionnaires se soucient des coûts financiers : par passager-km, les coûts de personnel des trains souterrains sont plus faibles que ceux des bus.

La consommation d'énergie totale du tramway de Croydon (figure 20.7) en 2006–2007 (y compris le dépôt des tramways et les infrastructures à



FIGURE 20.6. Les trains ne sont pas toujours pleins. Trois hommes et un violoncelle — les seuls occupants de cette voiture du train à grande vitesse de 10h30 reliant Édimbourg à Londres.



32 kWh pour 100 p-km

9 kWh pour 100 p-km

FIGURE 20.7. Quelques transports publics, et leur consommation moyenne d'énergie. A gauche : Quelques célèbres bus rouges britanniques. A droite : Le tramway de Croydon. Photos de Stephen Parascandolo.

chaque station) était de 9 kWh pour 100 p-km, avec une vitesse moyenne de 25 km/h.

Jusqu'à quel point les transports en commun pourraient-ils être intéressants ? Peut-être pouvons-nous en avoir une première indication en regardant les données qui proviennent du Japon et que montre le tableau 20.8. Avec 19 kWh pour 100 p-km et 6 kWh pour 100 p-km, bus et trains sont prometteurs. Le rail a pour lui l'avantage de résoudre nos deux objectifs à la fois — réduction de la consommation d'énergie et indépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. Les autobus et les autocars ont comme avantages évidents leur simplicité et leur souplesse d'utilisation, mais conserver une telle simplicité et une telle souplesse, tout en faisant en sorte que les autobus et les autocars s'affranchissent de leur dépendance aux combustibles fossiles, peut s'avérer un défi ardu.

Pour résumer, les transports publics (en particulier les trains électriques, les tramways et les autobus) semblent une voie prometteuse pour le transport de passagers — ils sont économes en termes d'énergie par passager-km, peut-être cinq ou dix fois meilleurs que les voitures. Toutefois, si les gens réclament la souplesse d'un véhicule particulier, quelles autres possibilités y a-t-il à notre disposition ?

Consommation d'énergie (kWh pour 100 p-km)	
Voiture	68
Bus	19
Rail	6
Air	51
Mer	57

TABEAU 20.8. Efficacité globale de modes de transport au Japon (1999).

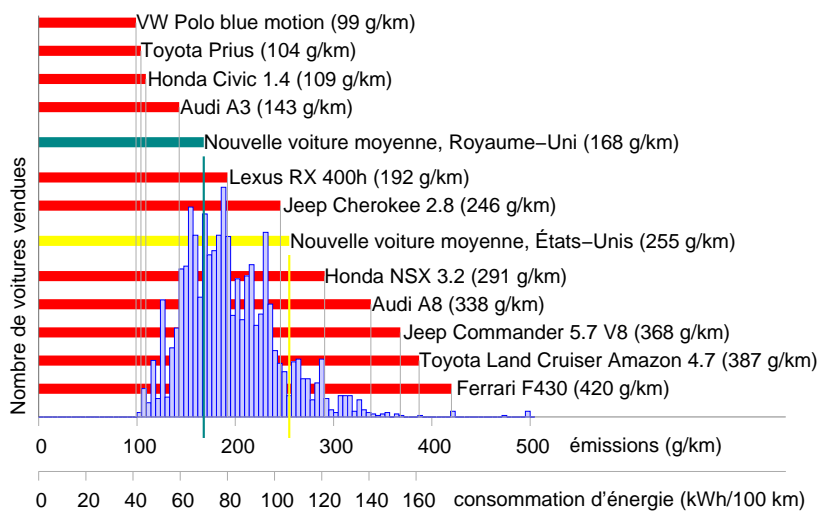


FIGURE 20.9. Pollution au carbone, en grammes de CO₂ par km, d'une sélection de voitures vendues au Royaume-Uni. L'axe horizontal représente le niveau des émissions, et la hauteur de l'histogramme bleu indique le nombre de modèles disponibles à la vente avec ce niveau d'émissions en 2006. Source : www.newcarnet.co.uk. L'échelle horizontale du bas indique les consommations d'énergie approximatives, en supposant que 240 g de CO₂ correspondent à 1 kWh d'énergie chimique.

Les véhicules particuliers : technologie, législation et incitations

Réduire la consommation d'énergie des voitures particulières, c'est possible. Le large éventail des efficacités énergétiques des voitures qui sont en vente le montre. Dans la même concession automobile en 2006, on pouvait acheter une Honda Civic 1.4 qui consomme environ 44 kWh pour 100 km, ou une Honda NSX 3.2 qui consomme 116 kWh pour 100 km (figure 20.9). Le fait que les gens achètent sans état d'âme des véhicules d'une telle diversité montre aussi qu'il nous faut plus d'incitations et de lois qui encouragent le consommateur insouciant à choisir des voitures plus économes en énergie. Il y a plusieurs façons de faire préférer la Honda Civic à la si gourmande Honda NSX 3.2 aux consommateurs : augmenter le prix du carburant ; donner un bon coup à la hausse aux taxes sur les véhicules neufs, en proportion de la consommation prévue sur l'ensemble de leur durée de vie ; donner un bon coup à la hausse aux taxes de roulage sur les véhicules gourmands ; attribuer des droits de parking particuliers aux véhicules les plus économes (figure 20.10), ou rationner le carburant. Toutes ces mesures sont impopulaires pour au moins une partie des électeurs. Une meilleure tactique législative pourrait être d'imposer une meilleure efficacité énergétique, plutôt que de continuer à laisser la possibilité d'un choix sans contrainte. Par exemple, on pourrait interdire purement et simplement, à partir d'une certaine date, la vente de toutes les voitures dont la consommation énergétique est supérieure à 80 kWh pour 100 km ; puis, après un certain temps, abaisser ce plafond à 60 kWh pour 100 km, puis 40 kWh pour 100 km, etc. Une autre voie possible est de donner plus de choix au consommateur, et d'obliger par la loi les constructeurs automobiles à réduire la consommation d'énergie moyenne de toutes les voitures qu'ils vendent. D'autres lois limitant le poids et la surface frontale des véhicules pourraient à la fois réduire la consommation de carburant et améliorer la sécurité pour les autres usagers de la route (figure 20.11). Aujourd'hui, les gens choisissent la voiture qu'ils achètent en fonction de la mode. Avec une législation forte sur l'efficacité, il pourrait encore y avoir un large choix selon la mode : simplement, tous les véhicules deviendraient économes en énergie. Vous pourriez choisir n'importe quelle couleur, pourvu que ce soit vert.

En attendant que les électeurs et les élus s'accordent pour légiférer en faveur de voitures efficaces en énergie, quelles sont les autres possibilités à notre disposition ?

Le vélo

Ma suggestion préférée est la mise en place d'excellentes infrastructures pour le vélo, accompagnée des lois appropriées (des limites de vitesse plus faibles, et des règles de priorité sur la route qui favorisent les



FIGURE 20.10. Parkings privilégiés pour les voitures électriques, à Ann Arbor (dans le Michigan, aux États-Unis).



FIGURE 20.11. Les 4x4 monstrueux sont assez volumineux pour masquer complètement la visibilité des piétons.



FIGURE 20.12. Un rond-point à Enschede, aux Pays-Bas.

cyclistes, par exemple). La figure 20.12 montre un rond-point dans la ville d'Enschede, aux Pays-Bas. Il y a deux cercles : celui pour les voitures se trouve à l'intérieur de celui pour les vélos, avec, pour les séparer, largement de quoi mettre une voiture dans sa longueur. Les règles de priorité sont les mêmes que celles d'un rond-point classique, sauf que les voitures qui quittent le rond-point central doivent laisser la priorité aux cyclistes qui traversent (exactement comme les voitures qui, en Grande-Bretagne, doivent laisser la priorité aux piétons sur les passages pour piétons). Là où les infrastructures pour les vélos sont excellentes, les gens vont les utiliser — la preuve en est, le nombre incalculable de vélos à l'extérieur de la gare d'Enschede (figure 20.13). D'une manière ou d'une autre, ce qu'offre la Grande-Bretagne pour les vélos (figure 20.14) n'est pas à la hauteur du standard hollandais.



FIGURE 20.13. Quelques vélos hollandais.



FIGURE 20.14. Pendant ce temps, en Grande-Bretagne...
Photo de droite par Mike Armstrong.

En 2005, à Lyon, a été lancé un réseau public de vélos géré par une entreprise privée, Vélo'v, qui s'est rapidement révélé populaire. La population de Lyon, de 470 000 habitants, est desservie par 2 000 vélos répartis sur 175 stations dédiées, dans une zone de 50 km² (figure 20.15). Presque partout dans le centre-ville, il y a une station à vélos à moins de 400 mètres. Les utilisateurs peuvent rejoindre le réseau en payant un droit d'entrée de 10 € par an, et ils peuvent ensuite emprunter des vélos gratuitement pour n'importe quel trajet de moins de 30 minutes. Pour les périodes de location plus longues, les usagers paient jusqu'à 1 € par heure. Et les visiteurs de passage à Lyon peuvent acheter des abonnements d'une semaine pour 1 €.

Autres possibilités législatives

Les limitations de vitesse sont un levier simple avec lequel on peut jouer. En règle générale, les voitures qui vont moins vite consomment moins d'énergie (cf. chapitre technique A). Avec de la pratique, les conducteurs peuvent apprendre à conduire de façon plus économe : moins utiliser l'accélérateur et le frein, et toujours conduire sur le rapport le plus élevé possible permet d'atteindre une baisse de sa consommation de carburant de 20 %.

Une autre manière de réduire la consommation de carburant est de réduire les embouteillages. S'arrêter et redémarrer, accélérer et ralentir est beaucoup moins efficace pour circuler que de conduire sans à-coups. Le nombre de litres consommés aux 100 kilomètres est particulièrement élevé quand on passe son temps bloqué dans un bouchon !

Des embouteillages apparaissent lorsqu'il y a trop de véhicules sur les routes. Une manière simple de réduire les encombrements est donc de regrouper les voyageurs dans moins de véhicules. Une manière frappante pour réfléchir à un basculement possible de la voiture au bus est de calculer la surface de route qui est nécessaire à chacun de ces deux modes de transport. Prenez une route nationale proche de la saturation, où la vitesse souhaitée est de 90 km/h. A cette vitesse, la distance de sécurité entre les voitures est de 72 mètres. Si nous supposons qu'il y a une voiture tous les 80 mètres, et que chaque voiture contient en moyenne 1,6 personnes, alors vider 40 personnes dans un seul autocar libère *deux kilomètres* de route !

On peut également réduire les embouteillages en proposant des alternatives sérieuses (pistes cyclables, transports publics) et en faisant payer plus cher les utilisateurs de la route s'ils contribuent aux embouteillages. Dans les notes de fin de ce chapitre, je décris une méthode simple et équitable pour gérer cette participation financière aux embouteillages.

Améliorer les voitures

En supposant que cette histoire d'amour entre le monde développé et la voiture ne soit pas près de s'achever, quelles sont les technologies sus-



FIGURE 20.15. Une station Vélo'v à Lyon.



FIGURE 20.16. Avec des embouteillages comme celui-là, il est encore plus rapide de marcher.

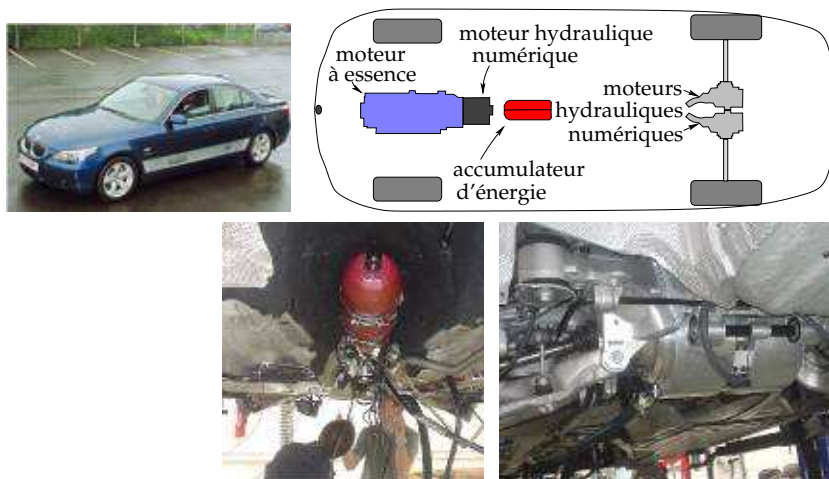


FIGURE 20.17. Une BMW 530i modifiée par Artemis Intelligent Power pour utiliser un système hydraulique contrôlé par ordinateur. En bas à gauche : un accumulateur de 6 litres (la bouteille rouge), capable de stocker environ 0,05 kWh d'énergie sous forme d'azote comprimé. En bas à droite : deux moteurs hydrauliques de 200 kWh, un pour chaque roue arrière, capables aussi bien d'accélérer que de ralentir la voiture. La voiture est toujours mue par son moteur à essence standard de 190 kW, mais grâce à la transmission hydraulique contrôlée par ordinateur et la récupération d'énergie au freinage, elle consomme 30 % de carburant de moins.

ceptibles d'apporter des économies d'énergie importantes? Gagner 10 % ou 20 %, c'est facile — nous avons déjà parlé de diverses manières de les atteindre, comme faire des voitures plus petites et plus légères. Une autre possibilité est de passer de l'essence au gazole. Les moteurs Diesel sont plus chers à fabriquer, mais ils ont tendance à être plus économes en carburant. Mais y a-t-il des technologies capables d'améliorer radicalement l'efficacité de la chaîne de conversion d'énergie? (Rappelez-vous que dans une voiture à essence classique, 75 % de l'énergie sont transformés en chaleur et évacués par le radiateur!). Et que dire de notre objectif de nous débarrasser des combustibles fossiles?

Dans cette section, nous allons parler de cinq technologies : la récupération d'énergie au freinage, les voitures hybrides, les voitures électriques, les voitures à hydrogène et les voitures à air comprimé.

La récupération d'énergie au freinage

Il y a quatre manières pour récupérer l'énergie lorsqu'un véhicule ralentit :

1. Un générateur électrique couplé aux roues peut charger une batterie électrique ou un supercondensateur.
2. Des moteurs hydrauliques mus par les roues peuvent comprimer de l'air, puis le stocker dans un petit réservoir.
3. L'énergie peut être stockée dans un volant d'inertie.
4. L'énergie récupérée au freinage peut être stockée sous forme d'énergie potentielle, en faisant monter le véhicule le long d'une rampe à chaque fois qu'il ralentit. Cette possibilité de stockage par énergie potentielle n'a que très peu de souplesse, car il faut une rampe au bon endroit lorsque le véhicule freine. Par contre, elle est très utile

pour les trains, et elle a été mise en pratique sur la ligne Victoria du métro de Londres, qui possède des stations en dos d'âne. Chaque station de la ligne se trouve au sommet d'une butte. Les trains à l'arrivée sont automatiquement ralentis par la montée de la butte, et ceux qui partent sont accélérés lorsqu'ils redescendent pour quitter la station. La conception des stations en dos d'âne permet une économie d'énergie de 5 % et un gain en vitesse de 9 %.

Lorsqu'elle repose sur une batterie pour stocker l'énergie, la récupération d'énergie au freinage préserve environ 50 % de l'énergie de la voiture dissipée lors du freinage, ce qui permet sans doute de réduire d'environ 20 % le coût énergétique de la conduite en ville.

Les systèmes de récupération d'énergie qui reposent sur des volants d'inertie et de l'hydraulique semblent fonctionner un peu mieux que les systèmes à batteries, préservant au moins 70 % de l'énergie du freinage. La figure 20.17 décrit une voiture hybride avec un moteur à essence qui alimente des moteurs hydrauliques contrôlés par ordinateur. Sur un cycle de conduite standard, cette voiture consomme 30 % de carburant en moins que la voiture à essence d'origine. En conduite urbaine, sa consommation d'énergie est réduite de moitié, passant de **131 kWh pour 100 km à 62 kWh pour 100 km** (de 14 L/100 km à 6,5 L/100 km). (Le mérite de cette amélioration de performance doit être partagé entre la récupération d'énergie au freinage et l'utilisation d'une technologie hybride). L'hydraulique et les volants d'inertie sont deux voies prometteuses pour gérer la récupération d'énergie au freinage, car il s'agit de systèmes de petite taille capables de gérer de fortes puissances. Un système à volant d'inertie pesant seulement 24 kg (figure 20.18), conçu pour le stockage d'énergie dans une voiture de course, peut stocker 400 kJ (0,1 kWh) d'énergie — suffisamment pour accélérer une voiture ordinaire jusqu'à 100 km/h, et il peut absorber ou fournir 60 kW de puissance. Pour être capables de fournir une telle puissance, il faudrait que les batteries électriques pèsent dans les 200 kg. Donc à moins que vous ne transportiez déjà toutes ces batteries dans votre véhicule, un système de récupération d'énergie au freinage devra probablement utiliser des condensateurs pour stocker cette énergie. Les supercondensateurs ont des paramètres de stockage d'énergie et de restitution de puissance comparables à ceux des volants d'inertie.

Les voitures hybrides

Les voitures hybrides comme la Toyota Prius (figure 20.19) ont un moteur et des systèmes de récupération d'énergie au freinage plus efficaces. Mais pour être honnête, les véhicules hybrides actuels ne sortent guère du lot (figure 20.9).

Les lignes horizontales de la figure 20.9 permettent de comparer quelques voitures, dont deux hybrides. Alors qu'en moyenne, les voitures neuves au Royaume-Uni émettent 168 g de CO₂, la Prius hybride émet envi-



FIGURE 20.18. Un système de stockage d'énergie récupérée du freinage par volant d'inertie. Photos gracieusement fournies par « Flybrid Systems ».



FIGURE 20.19. Une Toyota Prius — selon Jeremy Clarkson, « un moyen de locomotion très cher, très complexe, pas très vert, lent, construit au rabais, et absurde ».

ron 100 g de CO₂ par km, comme le font plusieurs autres véhicules non-hybrides — la Volkswagen Polo BlueMotion émet 99 g/km de CO₂, et il y a même une Smart qui émet seulement 88 g/km de CO₂.

La Lexus RX 400h est la seconde voiture hybride, dont la publicité outre-Manche utilisait avec le slogan « FAIBLES ÉMISSIONS, ZÉRO CULPABILITÉ ». Mais elle émet 192 g de CO₂ au kilomètre — c'est plus que la voiture moyenne au Royaume-Uni ! L'autorité de contrôle de la publicité a estimé que cette publicité violait le code de bonne conduite en matière de véracité, de comparaison et de revendication environnementale. « Nous avons considéré que [...] les lecteurs comprendraient vraisemblablement que la voiture n'est que peu ou pas une cause de dégradation de l'environnement, ce qui n'était pas le cas ; et que la voiture avait de faibles émissions comparées à celles des autres voitures, ce qui n'était pas non plus le cas. »

En pratique, les technologies hybrides semblent permettre des économies d'énergie de 20 ou 30 %. Donc ni ces hybrides essence-électrique, ni les hybrides essence-hydraulique présentés par la figure 20.17 ne semblent avoir vraiment entamé le défi du transport. Une réduction de 30 % de la consommation de combustibles fossiles, c'est impressionnant, mais au regard des objectifs de ce livre, ça n'est pas suffisant. Notre hypothèse de départ était que nous voulions nous débarrasser de la dépendance aux combustibles fossiles, ou du moins en réduire l'usage de 90 %. Peut-on atteindre ce but sans en revenir au vélo ?



FIGURE 20.20. Voitures électriques. De gauche à droite : la G-Wiz, la carcarasse rouillée d'une Sinclair C5, une Citroën Berlingo, et une Elettrica.

Les véhicules électriques

La voiture électrique REVA a été lancée en juin 2001 à Bangalore en Inde, et elle a été exportée au Royaume-Uni sous le nom de G-Wiz. Le moteur électrique de la G-Wiz a une puissance-crête de 13 kW, et elle peut produire une puissance en continu de 4,8 kW. Le moteur récupère l'énergie au freinage. Il est alimenté par huit batteries acide-plomb de 6 volts qui, à pleine charge, offrent « jusqu'à 77 kilomètres d'autonomie ». Une pleine charge consomme 9,7 kWh d'électricité. Ces chiffres impliquent un coût de transport de 13 kWh pour 100 km.

Les fabricants citent toujours la meilleure performance possible de leurs produits. Mais qu'en est-il dans la vraie vie ? La figure 20.21 montre la

performance réelle d'une G-Wiz à Londres. Après 19 recharges, le coût moyen du transport de cette G-Wiz aura été de **21 kWh pour 100 km** — soit environ quatre fois moins qu'une voiture moyenne à combustibles fossiles. Le meilleur résultat a été de 16 kWh pour 100 km, et le pire de 33 kWh pour 100 km. Si le sujet des émissions de carbone vous intéresse, sachez que 21 kWh pour 100 km sont équivalents, en Grande-Bretagne, à 105 g de CO₂ par km, en supposant que l'électricité a une empreinte carbone de 500 g de CO₂ par kWh.

Cependant, la G-Wiz se situe à l'extrémité basse de l'échelle des performances. Et si nous voulions plus — plus d'accélération, plus de vitesse, plus d'autonomie ? À l'autre extrémité de l'échelle, se trouve la Tesla Roadster. La Tesla Roadster de 2008 a une autonomie de 350 km ; ses batteries lithium-ion stockent 53 kWh et pèsent 450 kg (soit un rapport énergie/masse de 120 Wh/kg). Le véhicule pèse 1 220 kg et la puissance maximale de son moteur est de 185 kW. Quelle est la consommation d'énergie de cette voiture tout en muscles ? Fait remarquable, elle est inférieure à celle de la G-Wiz : **15 kWh pour 100 km**. Une autonomie de 350 km devrait être suffisante pour la plupart des gens, la plupart du temps : la preuve en est que seulement 8,3 % des gens font plus de 30 km pour aller travailler.

J'ai repris les chiffres de performance de nombre de véhicules électriques — ils sont listés dans les notes de fin de ce chapitre — et ils semblent confirmer que les véhicules électriques peuvent fournir un transport à un coût énergétique d'environ **15 kWh pour 100 km**. C'est cinq fois mieux que notre voiture à essence de départ, et significativement mieux que n'importe quelle voiture hybride. Hourra ! Pour atteindre un transport économe, nous ne sommes plus obligés de nous entasser dans les transports publics — on peut encore s'égayer, jouir de tous les plaisirs et libertés de voyager en solo, grâce aux véhicules électriques.

Cet instant de fête paraît idéal pour dévoiler le grand diagramme qui va résumer ce chapitre, la figure 20.23. Cette figure montre les besoins en énergie de toutes les formes de transport de passagers dont nous avons parlé, et de quelques-unes encore à venir.

OK, maintenant, la course est finie, et j'ai déjà annoncé deux vainqueurs — les transports publics et les véhicules électriques. Mais y a-t-il d'autres possibilités susceptibles de passer en tête la ligne d'arrivée ? La voiture à air comprimé, la voiture à hydrogène, qui n'en a pas entendu parler ? Nous allons en prendre quelques nouvelles. Si l'une ou l'autre s'avère meilleure que la voiture électrique, cela ne changera pas beaucoup les perspectives à long terme : quelle que soit celle de ces trois technologies que nous choisirons, les véhicules devront être rechargés avec de l'énergie obtenue à partir d'une source « verte ».

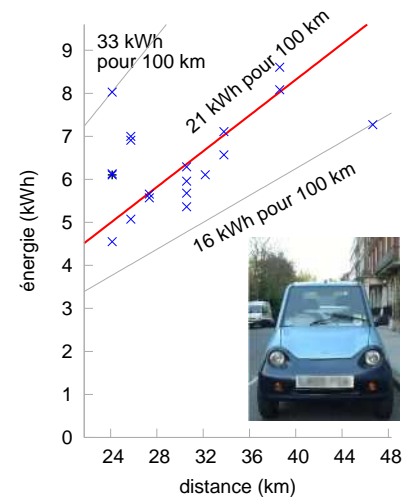


FIGURE 20.21. Quantité d'électricité nécessaire pour recharger une G-Wiz, en fonction de la distance parcourue. Les mesures ont été faites à la prise électrique.



FIGURE 20.22. La Tesla Roadster : **15 kWh pour 100 km**. www.teslamotors.com.

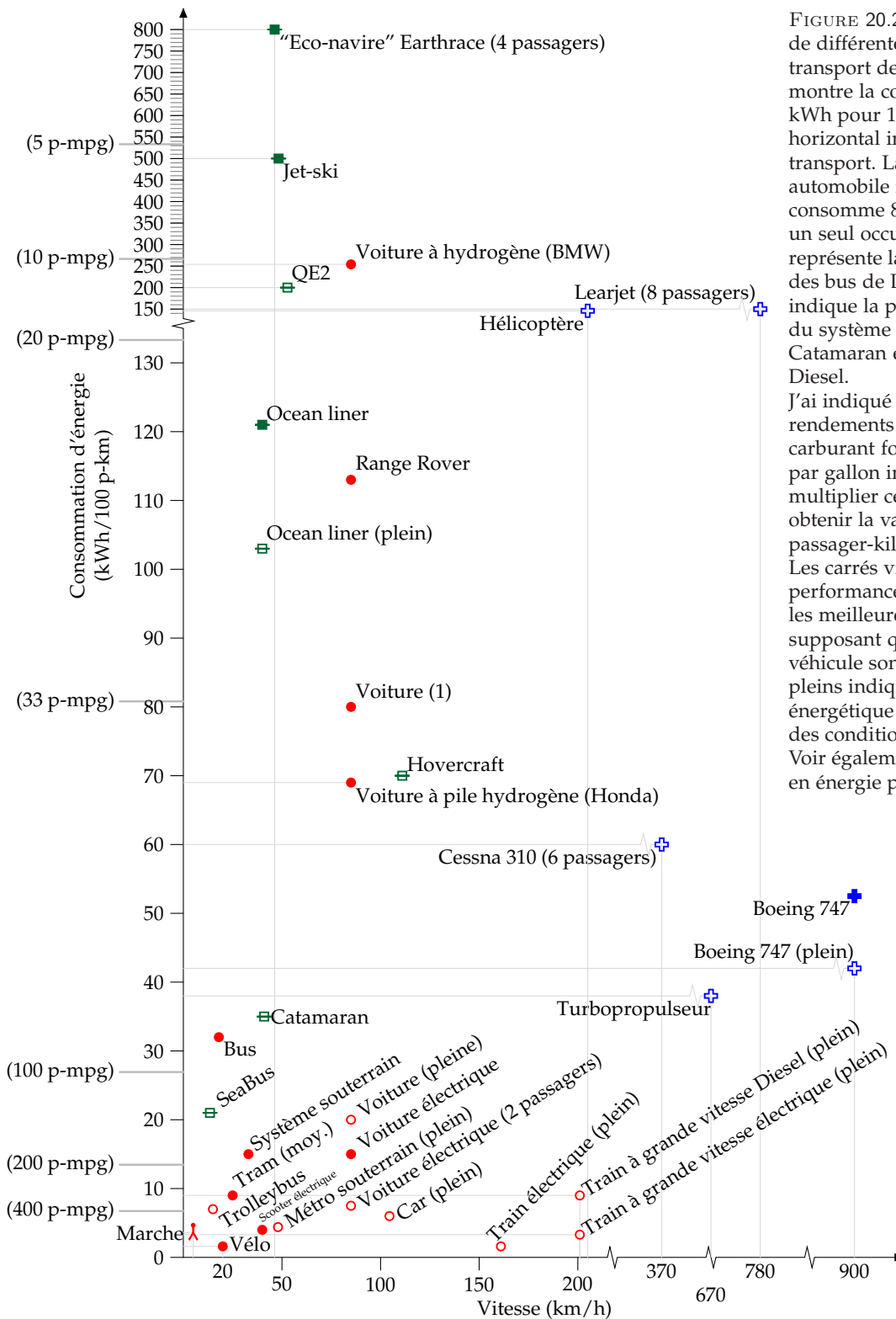


FIGURE 20.23. Besoins en énergie de différentes formes de transport de passagers. L'axe vertical montre la consommation d'énergie en kWh pour 100 passagers-km. L'axe horizontal indique la vitesse du transport. La « Voiture (1) » est une automobile moyenne britannique qui consomme 8,5 litres pour 100 km avec un seul occupant. Le « Bus » représente la performance moyenne des bus de Londres. Le « Métro » indique la performance de l'ensemble du système du métro londonien. Le Catamaran est un bateau à moteur Diesel.

J'ai indiqué sur l'échelle de gauche les rendements équivalents avec un carburant fossile, en passagers-milles par gallon impérial (p-mpg). Il faut multiplier ces chiffres par 3 pour obtenir la valeur en passager-kilomètre par litre (p-km/L). Les carrés vides indiquent la performance obtenue en appliquant les meilleures pratiques, et en supposant que toutes les places du véhicule sont utilisées. Les carrés pleins indiquent la performance énergétique réelle d'un véhicule dans des conditions d'utilisation typique. Voir également la figure 15.8 (besoins en énergie pour le transport de fret).

La voiture à air comprimé

Les véhicules à air comprimé ne sont pas une idée nouvelle. Des centaines de tramways mus par de l'air comprimé et de l'eau chaude parcouraient sans relâche les rues de Nantes et de Paris entre 1879 et 1911. La figure 20.24 montre une locomotive pneumatique allemande de 1958. A mon avis, en termes d'efficacité énergétique, la technique de l'air comprimé pour stocker de l'énergie n'est pas aussi bonne que celle de la batterie électrique. Le problème est que comprimer de l'air génère de la *chaleur* qui est peu susceptible d'être utilisée de manière efficace là où elle est produite ; et détendre l'air comprimé produit du *froid*, un autre sous-produit qui a le même inconvénient. Mais l'air comprimé peut être une technologie supérieure aux batteries électriques sur d'autres plans. Par exemple, l'air peut être comprimé des milliers de fois et ne s'use pas ! Il est intéressant de noter, cependant, que le premier produit commercialisé par la société Aircar (connue aussi sous le sigle MDI) est en fait un scooter... *électrique*. [www.theaircar.com/acf]

Des discussions ont lieu à Tata Motors, en Inde, au sujet de la fabrication de voitures à air comprimé, mais il est difficile de savoir si les véhicules à air comprimé vont connaître une renaissance, car personne n'a encore publié de spécification décrivant un prototype moderne. La limitation fondamentale est la suivante : l'énergie massique (c'est-à-dire la quantité d'énergie par kg) des systèmes de stockage d'air comprimé est d'environ 11 à 28 Wh par kg, ce qui est similaire à celle des batteries acide-plomb, et environ cinq fois moins que les batteries lithium-ion. (La figure 26.13, en page 235, donne des détails sur d'autres technologies de stockage.) Donc l'autonomie d'une voiture à air comprimé ne sera jamais supérieure à celle des toutes premières voitures électriques. Cependant, les systèmes de stockage d'air comprimé présentent trois avantages par rapport aux batteries : une plus longue durée de vie, une fabrication moins chère et l'utilisation de moins de produits chimiques nocifs.

La voiture à hydrogène — votre moteur va gazer

A mon avis, cette histoire d'hydrogène a été montée en épingle. Je serais ravi que l'on me prouve que j'ai tort, mais je ne vois pas comment l'hydrogène va pouvoir nous aider à résoudre nos problèmes énergétiques. L'hydrogène n'est pas une *source* miraculeuse d'énergie, c'est juste un *vecteur* d'énergie, comme l'est une batterie rechargeable. Et pour transporter de l'énergie, c'est un vecteur plutôt inefficace, avec, concrètement, tout un tas de défauts pratiques.

« L'économie de l'hydrogène » a reçu le soutien du magazine *Nature*, dans un article qui faisait l'éloge du gouverneur de Californie, Arnold Schwarzenegger, remplissant le réservoir d'un Hummer fonctionnant à l'hydrogène (figure 20.25). L'article de *Nature* glorifiait la vision d'Arnold au sujet des voitures à hydrogène capables de remplacer les « modèles



FIGURE 20.24. En haut : un tramway à air comprimé embarquant de l'air et de la vapeur à Nantes. Alimenter les tramways de Nantes consommait 4,4 kg de charbon (36 kWh) par véhicule-km, soit **115 kWh pour 100 p-km** si les tramways étaient pleins. [5qhvcb] En bas : Une locomotive à air comprimé ; poids : 9,2 tonnes ; pression : 175 bars ; puissance : 26 kW. Photos gracieusement fournies par Rüdiger Fach, Rolf-Dieter Reichert et le Frankfurter Feldbahnmuseum.



FIGURE 20.25. Le Hummer H2H : la révolution verte à l'américaine. Photo gracieusement fournie par General Motors.

polluants » avec la phrase-choc « le gouverneur, un “action hero” du climat au quotidien ». Mais la question fondamentale qu'il faut poser face à une telle démonstration d'héroïsme hydrogénique, c'est la suivante : « d'où vient l'énergie qu'il a fallu apporter pour fabriquer l'hydrogène ? » De plus, convertir l'énergie vers, puis à partir de l'hydrogène ne peut être fait que de manière inefficace — du moins, avec les technologies actuelles.

Voici quelques chiffres :

- Dans le projet CUTE (*Clean Urban Transport for Europe*), qui visait à démontrer la faisabilité et la fiabilité des autobus utilisant la technologie de la pile à combustible et de l'hydrogène, ravitailler en combustible les autobus requerrait entre 80 % et 200 % d'énergie en plus que les bus à moteur Diesel de référence.
- Alimenter une *Hydrogen 7*, la voiture à hydrogène construite par BMW, requiert 254 kWh pour 100 km — c'est-à-dire 220 % d'énergie en plus qu'une voiture européenne moyenne.

Si notre tâche était juste de dire « veuillez cesser d'utiliser des combustibles fossiles pour le transport, vous pouvez compter sur l'idée que des quantités infinies d'électricité verte sont disponibles gratuitement », alors oui, bien sûr, une solution de transport à ce point prodigue en énergie comme l'hydrogène pourrait prétendre être une réponse possible (bien que l'hydrogène présente d'autres problèmes). Mais l'électricité verte n'est pas gratuite. Car en effet, obtenir de l'électricité verte dans des quantités à la hauteur de notre consommation actuelle va être un sacré défi. Le sujet des combustibles fossiles va être aussi un sacré défi énergétique. Le problème du changement climatique va être aussi un sacré défi énergétique. Il va falloir nous concentrer sur des solutions qui consomment moins d'énergie, pas sur des « solutions » qui en consomment plus ! Or je ne connais aucune forme de transport terrestre qui consomme plus d'énergie que cette voiture à hydrogène. (A ma connaissance, les seuls moyens de transport qui soient pires, ce sont les jet-skis — qui consomment 500 kWh pour 100 km — et le bateau à grande vitesse *Earthrace* dont le moteur brûle du biodiesel, et dont le nom, « éco-bateau », est totalement absurde, puisqu'il consomme 800 kWh pour 100 p-km.)

Certains partisans de l'hydrogène rétorqueront que « la BMW Hydrogen 7 n'est qu'un premier prototype, et c'est une voiture de luxe avec beaucoup de muscles — la technologie va devenir plus efficace ». Eh bien, je l'espère, parce qu'il y a encore un sacré boulot. La Tesla Roadster (figure 20.22) est aussi un premier prototype, et c'est aussi une voiture de luxe avec beaucoup de muscles. Et elle est plus de dix fois plus économe en énergie que l'Hydrogen 7 ! Vous êtes libre de parier sur le cheval à hydrogène si vous voulez, et s'il gagne à la fin, tant mieux. Mais parier sur un cheval qui se trouve si loin derrière dans la course semble vraiment stupide. Il suffit de jeter à un coup d'œil à la figure 20.23 — si je n'avais pas écrasé le haut de l'axe vertical, la voiture à hydrogène ne serait même



FIGURE 20.26. BMW Hydrogen 7. Consommation d'énergie : 254 kWh pour 100 km. Photo de BMW.



FIGURE 20.27. Le mal nommé « éco-bateau » EarthRace. Photo par David Castor.

pas entrée dans la page !

Alors c'est vrai, la voiture à pile à combustible Honda, la FCX Clarity, fait mieux — elle se contente de « seulement » **69 kWh pour 100 km** — mais je vous prédis qu'une fois que tous ceux qui claironnent du « zéro-émission » à qui mieux mieux se seront tus, on réalisera que les voitures à hydrogène ne consomment pas moins d'énergie que la voiture moyenne à essence d'aujourd'hui.

L'hydrogène pose également d'autres problèmes. Les voici. L'hydrogène est un support de stockage de l'énergie moins commode que la plupart des carburants liquides, à cause du volume qu'il occupe, que ce soit sous forme de gaz comprimé ou de liquide (ce qui oblige à le maintenir à une température de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). Même comprimé à une pression de 700 bars (ce qui oblige à utiliser un récipient pressurisé sévèrement costaud), sa densité énergétique (c'est-à-dire son énergie par unité de volume) est 22 % celle de l'essence (presque cinq fois plus faible). Le réservoir cryogénique de la BMW Hydrogen 7 pèse 120 kg et stocke 8 kg d'hydrogène. De plus, l'hydrogène s'échappe peu à peu de n'importe quel récipient, aussi fermé soit-il. Si vous gardez votre voiture à hydrogène près d'une gare ferroviaire et que vous revenez une semaine plus tard, vous devez vous attendre à ce que l'essentiel de l'hydrogène du réservoir ait disparu.

Quelques interrogations sur les véhicules électriques

Vous avez montré que les voitures électriques étaient plus efficaces sur le plan énergétique que les voitures consommant des carburants fossiles. Mais sont-elles meilleures si notre objectif est de réduire les émissions de CO_2 , alors que l'électricité est toujours produite par des centrales thermiques qui brûlent des combustibles fossiles ?

C'est un calcul très facile à faire. Supposons que le coût énergétique du véhicule électrique soit de 20 kWh(e) pour 100 km. (A mon avis, 15 kWh(e) pour 100 km seraient parfaitement possibles, mais jouons un peu aux sceptiques pour ce petit calcul.) Si le réseau électrique a une empreinte carbone de 500 g par kWh(e), alors les émissions réelles de ce véhicule sont de **100 g de CO_2 par km**, ce qui est équivalent aux meilleures voitures qui brûlent directement des combustibles fossiles (figure 20.9). J'en conclus donc que passer aux voitures électriques est *déjà* une bonne idée, avant même que l'on verdisse notre approvisionnement en électricité.

Les voitures électriques, comme les voitures à combustibles fossiles, ont toutes des coûts de fabrication et d'utilisation. Les voitures électriques sont peut-être moins chères à l'usage, mais si les batteries ne durent pas longtemps, ne devriez-vous pas accorder plus d'attention aux coûts de fabrication ?

Oui, c'est une bonne remarque. Mon diagramme de transport ne montre que le coût d'utilisation. Si les voitures électriques ont besoin de nouvelles



FIGURE 20.28. La Honda FCX Clarity, berline à pile à combustible à hydrogène, avec Jamie Lee Curtis pour l'échelle. Photo gracieusement fournie par automobiles.honda.com.

batteries après quelques années, mes chiffres peuvent être sous-estimés. Les batteries dans une Prius sont prévues pour durer 10 ans seulement, et un nouveau jeu de batteries coûterait 5 000 €. Quel propriétaire d'une Prius vieille de 10 ans accepterait de supporter ce coût ? On peut s'attendre à ce que la plupart des Prius soient mises à la poubelle dès l'âge de 10 ans. C'est certainement un sujet d'inquiétude pour tous les véhicules électriques utilisant des batteries. J'imagine que je suis optimiste en croyant que, lorsque nous passerons aux véhicules électriques, la technologie des batteries progressera sur ce point.

Je vis dans un pays chaud. Comment est-ce que je pourrais utiliser une voiture électrique ? J'ai besoin de la climatisation, même si c'est énergivore !

Il y a une solution élégante à une telle demande : posez 4 m² de panneaux photovoltaïques sur les faces horizontales de la voiture électrique qui sont orientées vers le haut. S'il y a besoin de la climatisation, c'est que le soleil doit sûrement briller. Des panneaux avec un rendement de 20 % permettront de générer jusqu'à 800 W, ce qui suffit pour alimenter la climatisation d'une voiture. Les panneaux pourraient même apporter une contribution utile à la recharge des batteries de la voiture quand elle est garée. Une climatisation à énergie solaire a été incluse dans une Mazda en 1993 ; les cellules photovoltaïques étaient intégrées dans le toit ouvrant vitré.

Je vis dans un endroit froid. Comment est-ce que je pourrais utiliser une voiture électrique ? J'ai besoin du chauffage, même si c'est énergivore !

Le moteur d'un véhicule électrique, quand il est en marche, consomme en moyenne quelque chose comme 10 kW, avec un rendement de 90 à 95 %. Une partie de cette puissance perdue, c'est-à-dire les 5 à 10 % restants, sont dissipés sous forme de chaleur par le moteur. Il doit être possible de concevoir des voitures électriques de façon à ce que la chaleur dissipée par le moteur, équivalant à entre 250 et 500 W, puisse être redirigée vers l'habitacle de la voiture. Cette chaleur pourrait fournir de quoi désembuer le pare-brise et réchauffer les occupants.

Les batteries lithium-ion sont-elles sûres en cas d'accident ?

Certaines batteries lithium-ion sont dangereuses en cas de court-circuit ou de surchauffe, mais l'industrie des batteries produit désormais des batteries plus sûres, comme celles au lithium-phosphate. On peut voir une vidéo amusante sur la sécurité des batteries sur www.valence.com.

Y a-t-il assez de lithium disponible pour fabriquer les batteries d'une immense flotte de véhicules électriques ?

Les réserves mondiales de lithium sont estimées à 9,5 millions de tonnes dans des dépôts de minerai (page 208). Une batterie lithium-ion contient

3 % de lithium. Si l'on suppose que chaque véhicule possède une batterie de 200 kg, alors il nous faut 6 kg de lithium par véhicule. Les réserves estimées dans les dépôts de minerai sont donc suffisantes pour fabriquer les batteries de 1,6 milliard de véhicules. C'est plus que le nombre de véhicules dans le monde aujourd'hui (environ 1 milliard) — mais pas beaucoup plus, donc la quantité de lithium peut être un sujet d'inquiétude, surtout quand on prend en compte les ambitions contradictoires de la petite troupe de la fusion nucléaire (chapitre 24) qui voudraient engloutir du lithium dans leurs réacteurs. Or il y a des milliers de fois plus de lithium dans l'eau de mer ; les océans constitueront donc peut-être une ressource de secours utile. Cependant, selon le spécialiste du lithium R. Keith Evans, « les inquiétudes au sujet de la disponibilité du lithium pour fabriquer les batteries de véhicules hybrides ou électriques, ou d'autres applications prévisibles, sont infondées ». Et de toute façon, d'autres technologies de batteries sans lithium, comme les batteries zinc-air, sont en cours de mise au point [www.revolttechnology.com]. A mon avis, la voiture électrique est un bon plan !

L'avenir de l'avion ?

Airbus dit de son très gros porteur A380 qu'il est « un avion très économe en carburant ». En fait, il brûle seulement 12 % de moins de carburant par passager qu'un 747.

Boeing a annoncé des percées similaires : son nouveau 747-8 Intercontinental, dont on a claironné les qualités de sauveur de l'environnement, est (selon les annonces de Boeing) seulement 15 % plus économe en carburant qu'un 747-400.

Cette lenteur des progrès (qui contraste avec les progrès faits sur les voitures, pour lesquelles les changements technologiques apportent des améliorations d'un facteur deux, voire dix d'efficacité énergétique) est expliqué dans le chapitre technique C. Les avions se cognent contre un plafond dû à une limite fondamentale imposée par les lois de la physique. Tout avion, quelle que soit sa taille, *doit* dépenser une quantité d'énergie de l'ordre de 0,4 kWh par tonne-km pour rester en l'air sans tomber et pour maintenir sa vitesse. Les avions ont déjà été extrêmement optimisés, et il n'y a plus d'espoir de trouver de nouvelles améliorations significatives dans l'efficacité des avions.

J'ai longtemps cru que la façon de résoudre ce problème du transport longue distance était de revenir à la manière que l'on employait avant les avions : les paquebots. Et puis j'ai regardé les chiffres. La triste vérité, c'est que les paquebots consomment plus d'énergie par passager-kilomètre que les avions gros porteurs. Le Queen Elizabeth II consomme quatre fois plus d'énergie par passager-km qu'un avion gros porteur. D'accord, c'est un navire de luxe. Peut-on faire mieux avec des paquebots plus lents et des classes touriste ? Entre 1952 et 1968, la manière la plus économique pour



FIGURE 20.29. Un Airbus A380.



FIGURE 20.30. Le TSS Rijndam.

traverser l'Atlantique était d'emprunter l'un des deux navires construits par les Pays-Bas, que l'on appelait les « Jumeaux Économiques », le Maasdam et le Rijndam. Ils croisaient à une vitesse de 16,5 nœuds (30,5 km/h) : la traversée de la Grande-Bretagne à New-York prenait huit jours. Leur consommation d'énergie, lorsqu'ils étaient pleins avec 893 passagers, était de 103 kWh pour 100 p-km. Avec un taux de remplissage typique de 85 %, leur consommation d'énergie était de **121 kWh pour 100 p-km** — plus de deux fois celle d'un avion gros porteur. Pour être honnête vis-à-vis des bateaux, ils ne font pas que fournir du transport : ils fournissent également aux passagers et membres d'équipage du chauffage, de l'eau chaude, de la lumière et des divertissements pour plusieurs jours ; mais l'énergie économisée en restant enfermé sur le bateau est éclipsée par la consommation d'énergie du bateau, qui, dans le cas du Queen Elizabeth II, est d'environ 3 000 kWh par jour et par passager.

Hélas, je crains fort, donc, que les bateaux ne puissent jamais battre les avions en matière de consommation d'énergie. Si, en fin de compte, on veut malgré tout pouvoir voyager sur de longues distances sans utiliser de combustibles fossiles, peut-être les navires à propulsion nucléaire sont-ils une possibilité intéressante (figures 20.31 et 20.32).



FIGURE 20.31. Le NS Savannah, le premier navire commercial de transport de fret à propulsion nucléaire, passant sous le pont du Golden Gate en 1962.

Qu'en est-il du fret ?

Aussi surprenant que cela puisse paraître, le transport maritime international est un consommateur de combustibles fossiles très efficace en énergie. Entre le transport par route et celui par porte-conteneurs, c'est donc le premier qui devrait prioritairement se débarrasser des combustibles fossiles. Mais les combustibles fossiles sont une ressource limitée, et les bateaux devront bien un jour être alimentés par autre chose. Les biocarburants *pourraient* être une solution possible. Une autre possibilité pourrait être l'énergie nucléaire. Le premier navire à propulsion nucléaire pour le transport de marchandises et de passagers a été le NS Savannah, lancé en 1962 dans le cadre de l'initiative du président Eisenhower « *Atoms for Peace* » (figure 20.31). Mû par un réacteur nucléaire de 74 MW couplé à un moteur de 15 MW, le Savannah avait une vitesse de croisière de 21 nœuds (39 km/h), et pouvait transporter 60 passagers et 14 000 tonnes de fret. Cela représente un coût de transport de marchandises de 0,14 kWh par tonne-km. Il pouvait parcourir 500 000 km sans ravitaillement. Il existe déjà de nombreux navires à propulsion nucléaire, tant militaires que civils. Par exemple, la Russie possède dix navires brise-glace à propulsion nucléaire, dont sept sont toujours en activité. La figure 20.32 montre le brise-glace à propulsion nucléaire Yamal, qui possède deux réacteurs de 171 MW, et dont les moteurs peuvent développer 55 MW.



FIGURE 20.32. Le brise-glace à propulsion nucléaire Yamal, avec à son bord 100 touristes, et se dirigeant vers le pôle Nord, en 2001. Photo par Wofratz.

« Attendez ! Vous n'avez pas parlé de la sustentation magnétique ! »

La société allemande Transrapid, qui a construit le train à sustentation magnétique appelé Maglev pour Shanghai, en Chine (figure 20.33) déclare que « le système Superspeed Maglev de Transrapid est sans équivalent dans le monde pour le niveau de bruit, la consommation d'énergie, et l'occupation au sol. Ce système de transport novateur sans contact au sol offre la mobilité sans perturber l'environnement ».

La sustentation magnétique est l'une de ces nombreuses technologies qui excitent beaucoup les gens quand il s'agit de parler des problèmes énergétiques. En fait, en termes de consommation d'énergie, la comparaison avec d'autres trains à grande vitesse n'est pas si flatteuse que ce que le battage médiatique pourrait laisser penser. Le site Internet de Transrapid compare son train avec l'InterCity-Express (ICE), un train électrique à grande vitesse allemand.

Comparaison des trains à grande vitesse à 200 km/h	
Transrapid	2,2 kWh pour 100 places-kilomètres
ICE	2,9 kWh pour 100 places-kilomètres

Les principales raisons pour lesquelles le « Maglev » est légèrement meilleur que l'ICE sont les suivantes : le moteur à propulsion magnétique a un rendement élevé, le train lui-même a une faible masse, car l'essentiel du système de propulsion se trouve dans le rail plutôt que dans le train, et il y a plus de passagers dans le train pour un même volume, parce que l'espace nécessaire aux moteurs a été libéré. Oh, et puis peut-être aussi parce que les données proviennent du site Web de la société qui fabrique le Maglev, donc il faut bien que le Maglev paraisse meilleur !

Soit dit en passant, les gens qui l'ont vu à Shanghai me disent qu'à pleine vitesse, le train Transrapid est « à peu près aussi silencieux qu'un avion à réaction ».

Notes et bibliographie

Page n°

- 141 *Il y a une statistique souvent citée qui dit entre les lignes que « seulement 1 pour cent de l'énergie utilisée par une voiture sert à déplacer son conducteur ».* En fait, le pourcentage précisé dans cette légende n'est pas toujours le même. Certains prétendent que « 5 % de l'énergie sert au déplacement du conducteur ». D'autres affirment que « à peine 0,3 % de l'énergie du carburant sert à déplacer le conducteur ». [4qgg8q] Mon point de vue est qu'aucune de ces statistiques n'est correcte, ni même utile pour comprendre quoi que ce soit.



FIGURE 20.33. Un train Maglev à sustentation magnétique à l'aéroport international de Pudong, à Shanghai. « Rouler sans roue, voler sans aile. » Photo d'Alex Needham.



FIGURE 20.34. Neuf véhicules sur dix à Londres sont des G-Wiz. (Et 95 % des statistiques ne sont que pure invention.)

- 142 *La performance du vélo est d'environ la même que celle de l'éco-voiture.* Faire du vélo à une place coûte environ 1,6 kWh pour 100 km, en supposant une vitesse de 20 km/h. Pour plus de détails et de références, se référer au chapitre A, page 309.
- 142 *Le train omnibus à 8 voitures reliant Cambridge à Londres* (figure 20.4) pèse 275 tonnes et peut transporter jusqu'à 584 passagers assis. Sa vitesse maximale est de 160 km/h, et sa puissance développée est de 1,5 MW. Si toutes les places sont occupées, ce train, à pleine vitesse, consomme tout au plus **1,6 kWh pour 100 p-km**.
- *Le métro de Londres.* Un train de la ligne Victoria est composé de quatre voitures motrices de 30,5 tonnes et de quatre voitures non motrices de 20,5 tonnes. A pleine charge, un train moyen pèse 228 tonnes. Sa vitesse maximale est de 70 km/h, et sa vitesse moyenne de 50 km/h. Un train dont la plupart des places sont occupées transporte environ 350 passagers ; lorsqu'il est bondé, il en emporte environ 620. La consommation d'énergie aux heures de pointe est d'environ **4,4 kWh pour 100 passagers-km** (Catling, 1966).
- 143 *Trains à grande vitesse.*
Le train Intercity 125 à moteur Diesel (à droite sur la figure 20.5) pèse 410 tonnes. Lorsqu'il roule à 200 km/h, la puissance fournie « au rail » est de 2,6 MW. Lorsque le train est plein, le nombre total de passagers transportés est d'environ 500. La consommation moyenne de carburant est d'environ 0,84 litre de gasoil pour 100 places-km [5o5x5m], ce qui représente un coût de transport d'environ **9 kWh pour 100 places-km**. Le train électrique Class 91 (à gauche sur la figure 20.5) roule à 225 km/h et consomme 4,5 MW. Selon Roger Kemp, la consommation moyenne d'énergie de ce train est de **3 kWh pour 100 places-km** [5o5x5m]. Le document du gouvernement [5fbæg9] précise que les trains à grande vitesse des côtes est et ouest consomment environ 15 kWh par km (train entier). Le nombre de places dans chaque train est respectivement de 526 et de 470. Ce qui donne donc entre **2,9 et 3,2 kWh pour 100 places-km**.
- *Le coût énergétique total de toutes les rames de métro de Londres était de 15 kWh pour 100 p-km [...] Le coût énergétique total de tous les autobus de Londres était de 32 kWh pour 100 p-km.* Source : [679rpc]. Source concernant la vitesse des trains et des bus : Ridley et Catling (1982).
- 144 *Le Tramlink de Croydon.*
www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/TfL-environment-report-2007.pdf, www.tfl.gov.uk/assets/downloads/corporate/London-Travel-Report-2007-final.pdf, www.croydon-tramlink.co.uk.
- 146 *... d'excellentes infrastructures pour le vélo ...* Le Guide de conception des rues du Royaume-Uni [www.manualforstreets.org.uk] encourage une conception des rues qui impose une vitesse naturelle de 30 km/h. Voir aussi Franklin (2007).
- 147 *Une méthode simple et équitable pour gérer la participation financière aux embouteillages.* C'est Stephen Salter qui m'a indiqué une excellente manière d'instaurer une taxe anti-embouteillage. Le simple péage urbain à la journée,

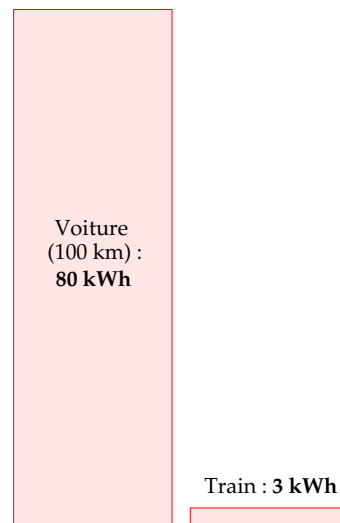


FIGURE 20.35. 100 km tout seul dans sa voiture, comparés à 100 km dans un train électrique à grande vitesse, complet.



FIGURE 20.36. Des tramways qui fonctionnent bien à Istanbul et aussi à Prague.

comme celui actuellement en vigueur à Londres, n'envoie qu'un signal rudimentaire aux conducteurs, en les taxant dès qu'ils atteignent la zone de péage. Une fois que le propriétaire d'une voiture a décidé de payer le prix pour une journée et qu'il a atteint une zone embouteillée, il ne reçoit plus aucune incitation à rouler *peu*, ou moins que ce qu'il avait prévu, dans cette zone. Et il n'est aucunement récompensé par un quelconque rabais s'il choisit avec soin sa route dans la zone pour éviter un embouteillage.

Au lieu d'avoir un système de péage centralisé qui décide à l'avance quand et où il faut payer pour les embouteillages, ce qui oblige en plus à faire appel à des installations coûteuses et intrusives pour surveiller et enregistrer les mouvements des véhicules à l'entrée et au sein de chaque zone, Salter propose une méthode bien plus simple, décentralisée et anonyme pour facturer aux conducteurs le fait de circuler dans un trafic automobile lent et chargé, partout où et quand cela a lieu. De plus, le système pourrait fonctionner n'importe où dans le pays. Voici comment cela marche. Il nous faut un dispositif qui réponde à la question « à quel point le trafic dans lequel je suis est-il chargé ? » Une bonne mesure du niveau d'embouteillage là où l'on se trouve est la réponse à la question : « combien y a-t-il de véhicules actifs près de moi ? » Lorsque la circulation est fluide, les voitures sont plus éloignées les unes des autres que lorsque le trafic est lent. C'est quand il est complètement bouché que le trafic est le plus dense. Le nombre de véhicules actifs qui sont tout près peuvent être détectés de manière anonyme en installant dans chaque véhicule un petit émetteur-récepteur radio (un peu comme un téléphone portable très bon marché) qui émet des petits bips par radio à intervalle régulier dès que le moteur est en marche, et qui compte le nombre de bips qu'il reçoit des véhicules environnants. Le montant du péage urbain serait alors proportionnel au nombre de bips reçus ; cette taxe pourrait être payée aux stations services à chaque fois que le conducteur fait le plein. Et l'émetteur-récepteur radio remplacerait avantageusement le disque de taxation actuellement utilisé au Royaume-Uni.

- 149 *Les systèmes de récupération d'énergie qui reposent sur des volants d'inertie et de l'hydraulique récupèrent au moins 70 % de l'énergie du freinage.* De l'air comprimé est utilisé pour récupérer l'énergie du freinage sur les camions ; *eaton.com* annonce que son système « *hydraulic launch assist* » récupère 70 % de l'énergie cinétique [5cp27j].

Le système à volant d'inertie de *flybridsystems.com* absorbe également 70 % de l'énergie cinétique. www.flybridsystems.com/F1System.html

Le freinage à récupération électrique préserve en gros 50 % de l'énergie dissipée lors du freinage. Source : E4tech (2007).

- *Pour être capables de fournir 60 kW de puissance, il faudrait que les batteries électriques pèsent dans les 200 kg.* De bonnes batteries lithium-ion ont une puissance massique (c'est-à-dire une puissance par kilogramme de batterie) de 300 W/kg (Horie et al. (1997) ; Mindl (2003)).
- *En moyenne, les voitures neuves au Royaume-Uni émettent 168 g de CO₂ par km.* C'est le chiffre pour l'année 2006 (King, 2008). La moyenne des émissions des véhicules particuliers neufs aux États-Unis était de 255 g par km (King, 2008).

- *La Toyota Prius a un moteur plus efficace.* Le moteur à essence de la Prius utilise un cycle Atkinson, plutôt que l'habituel cycle Otto. En mélangeant astucieusement la puissance électrique et celle de l'essence selon la conduite du conducteur, la Prius s'en sort avec un moteur plus petit que ce que l'on trouve habituellement à bord d'une voiture aussi lourde, et elle convertit plus efficacement l'énergie de l'essence qu'un moteur à essence conventionnel.
- 150 *Les technologies hybrides semblent permettre des économies d'énergie de 20 ou 30 %.* Par exemple, si on lit le rapport de recherche de Hitachi qui décrit les trains hybrides (Kaneko et al., 2004) : « on s'attend à ce que [la génération de puissance à haute efficacité et la récupération d'énergie au freinage] permettent d'économiser environ 20 % de carburant comparé à des trains traditionnels à motrice Diesel. »
- 151 *Seulement 8,3 % des gens font plus de 30 km pour aller travailler.* Source : Edington (2006). La dépendance de l'autonomie d'une voiture électrique à la taille de ses batteries est discutée dans le chapitre A (page 308).
- *... en supposant que l'électricité a une empreinte carbone de 500 g de CO₂ par kWh.* Ce niveau d'émissions de CO₂ pour l'électricité sont ceux de la Grande-Bretagne. En France, selon l'ADEME, la production d'1 kWh d'électricité émet en moyenne 180 g de CO₂ environ.
 - *Panorama de véhicules électriques.* Ils sont énumérés ci-dessous, sans ordre particulier. Les chiffres de performance proviennent principalement des constructeurs. Comme nous l'avons vu page 150, les performances réelles ne correspondent pas toujours aux allégations des constructeurs.

Th!nk Voitures électriques fabriquées en Norvège. La Th!nk Ox a cinq portes et son autonomie est de 200 km. Ses batteries pèsent 350 kg, et la voiture pèse en tout 1 500 kg. Sa consommation d'énergie est d'environ **20 kWh pour 100 km.** www.think.no

Smart électrique « La version électrique est mue par un moteur de 40 chevaux; elle peut parcourir jusqu'à 110 kilomètres et a une vitesse de pointe de 110 km/h. La recharge s'effectue sur une prise électrique standard et coûte environ 1,5 €, soit la production de l'équivalent de 60 g/km d'émissions de CO₂ par la centrale électrique. [cf. la Smart équivalente mue par un moteur à essence émet 116 g/km de CO₂.] Une charge complète prend environ huit heures, mais la batterie peut être rechargée de 20 % à 80 % de sa charge en à peu près trois heures et demi. » [www.whatcar.com/news-article.aspx?NA=226488]

Berlingo Electrique 500E, un utilitaire urbain (figure 20.20), qui dispose de 27 batteries nickel-cadmium et d'un moteur de 28 kW. Il peut transporter une charge utile de 500 kg. Vitesse de pointe : 100 km/h; autonomie : 100 km; consommation : **25 kWh pour 100 km.** (Ces estimations ont été aimablement fournies par un propriétaire de Berlingo.) [4wm2w4]

i MiEV Cette voiture électrique est annoncée avec une autonomie de 160 km, et un ensemble de batteries de 16 kWh. Cela fait **10 kWh pour 100 km** — mieux que le G-Wiz — et alors qu'il est difficile de faire tenir deux Européens adulte



FIGURE 20.37. Th!nk Ox. Photo de www.think.no.



FIGURE 20.38. La i MiEV de Mitsubishi Motors Corporation. Elle a un moteur de 47 kW, pèse 1 080 kg, et une vitesse de pointe de 130 km/h.

dans une G-Wiz, le prototype de Mitsubishi a quatre portes et quatre vraies places (figure 20.38). [658ode]

EV1 Ce véhicule deux places de General Motors a une autonomie comprise entre 120 et 240 km, une vitesse de pointe de 130 km/h, et des batteries nickel-hydrure métallique stockant 26,4 kWh. Cela fait une consommation d'énergie comprise entre 11 et 22 kWh pour 100 km.

Lightning (figure 20.39) Cette voiture possède quatre moteurs sans balai, un dans chaque roue ; elle dispose d'un système de récupération d'énergie au freinage, et de batteries Nanosafe à charge rapide au lithium-titanate pouvant stocker 36 kWh, ce qui lui confère une autonomie de 320 km. Cela fait 11 kWh pour 100 km.

Aptera Ce fantastique poisson fuyant est un véhicule à deux places, qui prétend avoir une consommation d'énergie de 6 kWh pour 100 km. Elle a un coefficient de pénétration dans l'air (C_x) de 0,11 (figure 20.40). Des versions électriques et des modèles hybrides sont en cours de développement.

Loremo Comme l'Aptera, la Loremo (figure 20.41) a une surface frontale réduite et un faible coefficient de pénétration dans l'air (0,2) ; elle devrait être disponible à la fois dans des versions électriques et à carburant fossile. Elle dispose de deux places adultes et de deux places enfant à l'arrière. La Loremo EV aura des batteries lithium-ion ; elle est annoncée avec un coût énergétique de 6 kWh pour 100 km, une vitesse de pointe de 170 km/h, et une autonomie de 153 km. Elle pèse 600 kg.

eBox La eBox possède une batterie lithium-ion d'une capacité de 35 kWh et pèse 280 kg, offrant une autonomie de 140 à 180 kilomètres. Son moteur a une puissance en crête de 120 kW et peut produire une puissance en continu de 50 kW. Consommation d'énergie : 12 kWh pour 100 km.

Ze-0 Une voiture à cinq portes et cinq places. Vitesse de pointe : 80 km/h. Autonomie : 80 kilomètres. Poids total : 1 350 kg. Les batteries acide-plomb ont une capacité de 18 kWh. Moteur : 15 kW. 22,4 kWh pour 100 km.

e500 Une voiture italienne ressemblant à une Fiat, avec deux portes et quatre places. Vitesse de pointe : 95 km/h ; autonomie en ville : 120 km. Batterie : lithium-polymère.

MyCar Une voiture à deux places, de conception italienne. Vitesse de pointe : 65 km/h. Autonomie maximale : 95 km. Batteries acide-plomb.

Mega City Une voiture à deux places avec une puissance maximale en continu de 4 kW et une vitesse de pointe de 65 km/h : 11,5 kWh pour 100 km. Poids à vide (avec les batteries) de 725 kg. Les batteries acide-plomb ont une capacité de 10 kWh.

Xebra Annoncée avec une autonomie de 40 km à partir d'une charge de 4,75 kWh, soit une consommation de 12 kWh pour 100 km. Vitesse de pointe : 65 km/h. Batteries acide-plomb.



FIGURE 20.39. Lightning : 11 kWh pour 100 km. Photo de www.lightningcarcompany.co.uk.



FIGURE 20.40. L'Aptera. 6 kWh pour 100 km. Photo de www.aptera.com.



FIGURE 20.41. La Loremo. 6 kWh pour 100 km. Photo de evolution.loremo.com.

TREV Ce « véhicule à deux places et énergie renouvelable » (traduction de l'anglais « *Two-Seater Renewable Energy Vehicle* » ou TREV) est un prototype développé par l'Université d'Australie du sud (figure 20.42). Ce véhicule à trois roues a une autonomie de 150 km, une vitesse de pointe de 120 km/h, une masse de 300 kg, et des batteries lithium-polymère qui pèsent 45 kg. Au cours d'un voyage réel de 3 000 kilomètres, la consommation d'énergie de ce véhicule a été de **6,2 kWh pour 100 km**.

Venturi Fetish La Venturi Fetish possède une batterie de 28 kWh qui pèse 248 kg. La voiture pèse 1 000 kg et a une autonomie de 160 à 250 km. Cela fait **entre 11 et 17 kWh pour 100 km**. www.venturifetish.fr/fetish.html

Toyota RAV4 EV Ce véhicule — un mini 4x4 tout-électrique a été commercialisé par Toyota entre 1997 et 2003 (figure 20.43). Le RAV4 EV dispose de 24 batteries nickel-hydrure métallique de 12 volts et 95 ampères-heures, capables de stocker 27,4 kWh d'énergie ; elle a une autonomie de 130 à 190 kilomètres. Cela fait une consommation d'énergie de **14 à 21 kWh pour 100 km**. Le RAV4 EV a été populaire auprès de la police de Jersey.

Phoenix SUT Il s'agit d'un 4x4 à cinq places fabriqué en Californie, qui a une autonomie allant « jusqu'à 210 kilomètres » à partir d'un ensemble de batteries lithium-ion d'une capacité de 35 kWh (ce qui fait **17 kWh pour 100 km**.) Les batteries peuvent être rechargées avec une prise spéciale en 10 minutes. www.gizmag.com/go/7446/

Modec, véhicule utilitaire Le Modec est un véhicule de livraison qui peut transporter deux tonnes de charge utile sur 160 kilomètres. Poids à vide : 3 000 kg. www.modec.co.uk

Smith Ampere Un petit véhicule de livraison plus petit, avec des batteries lithium-ion d'une capacité de 24 kWh. Autonomie « supérieure à 160 kilomètres ». www.smithelectricvehicles.com

Minibus électriques Tiré de www.smithelectricvehicles.com : Batteries lithium-ion d'une capacité de 40 kWh. Moteur de 90 kW avec récupération d'énergie au freinage. Autonomie « supérieure à 160 kilomètres ». 15 places. Poids à vide du véhicule : 3 026 kg. Charge utile : 1 224 kg. Cela fait une performance pour ce véhicule d'au mieux **25 kWh pour 100 km**. A pleine charge, il pourrait fournir du transport avec un coût impressionnant de **2 kWh pour 100 p-km**.

Autocar électrique Le bus Thunder Sky a une autonomie de 290 kilomètres et une durée de recharge de trois heures. www.thunder-sky.com

Scooters électriques Le Vectrix est un scooter de poids (figure 20.44). Ses batteries (nickel-hydrure métallique) ont une capacité de 3,7 kWh. Il peut parcourir 110 kilomètres à une vitesse de 40 km/h, après une charge de deux heures sur une prise électrique standard. Cela fait 110 km pour 3 kWh, soit **2,75 kWh pour 100 km**. Sa vitesse de pointe est de 100 km/h. Il pèse 210 kg et a une puissance en crête de 20 kW. www.vectrix.com

L'« Oxygen Cargo » est un scooter plus petit. Il pèse 121 kg, a une autonomie de 60 kilomètres, et il a besoin de 2 à 3 heures pour être rechargé. Puissance



FIGURE 20.42. Le TREV. **6 kWh pour 100 km**. Photo de www.unisa.edu.au.



FIGURE 20.43. Toyota RAV4 EV. Photo de Kenneth Adelman, www.solarwarrior.com.



FIGURE 20.44. Vectrix : **2,75 kWh pour 100 km**. Photo de www.vectrix.com.

en crête : 3,5 kW. Vitesse de pointe : 45 km/h. Il dispose de deux batteries lithium-ion et d'un système de récupération d'énergie au freinage. Son autonomie peut être étendue en ajoutant des batteries supplémentaires, qui stockent environ 1,2 kWh et pèsent 15 kg chacune. Consommation d'énergie : 4 kWh pour 100 km.

153 *L'énergie massique des réservoirs d'air comprimé n'est que d'environ 11 à 28 Wh par kg.* La limite théorique, en supposant une compression isotherme parfaite, se calcule ainsi : si 1 m³ d'air ambiant est lentement comprimé dans un récipient de 5 litres à 200 bars, l'énergie potentielle emmagasinée est de 0,16 kWh dans 1,2 kg d'air. En pratique, un réservoir de 5 litres qui supporte ce genre de pression pèse environ 7,5 kg s'il est en acier, et 2 kg s'il est fait de Kevlar ou de fibres de carbone, et l'énergie massique globale atteinte serait alors de 11 à 28 Wh par kg. La densité d'énergie théorique est la même, quelle que soit le volume du récipient.

- « *Le gouverneur, un 'action hero' du climat au quotidien* ». Notez le jeu de mots avec le titre de l'un des films de l'acteur, « *Last action hero* ».

Arnold Schwarzenegger ... remplissant le réservoir d'un Hummer fonctionnant à l'hydrogène. *Nature* 438, 24 novembre 2005. Je ne dis pas que l'hydrogène ne sera *jamais* utile pour le transport, mais j'aurais espéré qu'une revue aussi sérieuse et distinguée que *Nature* considère le battage autour de l'hydrogène avec une approche un tant soit peu critique, et pas seulement euphorique.

En septembre 2008, *The Economist* écrivait « Presque plus personne ne conteste que ... la plupart des voitures seront, à terme, uniquement alimentées par des batteries. »

D'un autre côté, si l'on veut en entendre plus venant des partisans du transport à l'hydrogène, on peut se référer aux pages du Rocky Mountain Institute sur « l'HyperCar » www.rmi.org/hypercar/.

« L'hydrogène et les piles à combustible ne sont pas la bonne voie. La décision de l'administration Bush et de l'État de Californie d'emprunter la route de l'hydrogène est tout simplement la pire décision qui ait été prise ces dernières années. »

James Woolsey,
président du Comité Consultatif de la Fondation américaine sur les énergies propres
« US Clean Fuels Foundation », 27 novembre 2007

154 *Dans le projet Clean Urban Transport for Europe, ravitailler en combustible les autobus à hydrogène requerrait entre 80 et 200 % d'énergie en plus que les bus à moteur Diesel de référence.* Source : CUTE (2006), Binder et al. (2006).

- *Alimenter la voiture à hydrogène fabriquée par BMW nécessite trois fois plus d'énergie qu'une voiture moyenne.* La moitié du coffre de la voiture BMW « Hydrogen 7 » est occupée par son réservoir d'hydrogène de 170 litres, soit 8 kg d'hydrogène, ce qui lui donne une autonomie de 200 km. [news.bbc.co.uk/1/hi/business/6154212.stm]. La valeur calorifique de l'hydrogène est de 39 kWh par kg, et si l'on suit les meilleures pratiques connues, le coût énergétique pour fabriquer de l'hydrogène est de 63 kWh par kg (composé de 52 kWh de gaz naturel et de 11 kWh d'électricité) (CUTE, 2006). Remplir le réservoir de 8 kg a donc un coût énergétique d'au moins 508 kWh; et si ce réservoir offre effectivement 200 km d'autonomie, le coût de l'énergie est de 254 kWh pour 100 km.

« L'Hydrogen 7 et ses cousins à pile à combustible hydrogène sont, à bien des égards, de simple miroirs aux alouettes ».

David Talbot, MIT Technology Review
www.technologyreview.com/Energy/18301/

La voiture de Honda à pile à combustible, la FCX Clarity, pèse 1 625 kg, stocke 4,1 kg d'hydrogène à une pression de 345 bars, et, paraît-il, a une autonomie de 450 kilomètres, en étant capable de parcourir 91 km par kg d'hydrogène dans un cycle mixte standardisé de conduite [czjjo], [5a3ryx]. En prenant le coût de production de l'hydrogène mentionné dans la note précédente, et en supposant que le gaz naturel est utilisé comme principale source d'énergie, cette voiture a un coût de transport de 69 kWh pour 100 km.

« Honda peut sans doute amuser les journalistes et leur faire croire que les voitures à hydrogène sont « zéro-émission ». Mais malheureusement, il est impossible de tromper le climat ».

Merrick Godhaven

- 157 *Une batterie lithium-ion contient 3 % de lithium.* Source : Fisher et al. (2006).
- *Le spécialiste du lithium R. Keith Evans affirme que « les inquiétudes au sujet de la disponibilité du lithium [...] sont sans fondement »* – Evans (2008).
- 158 *Deux paquebots néerlandais connus sous le nom des « Jumeaux Économiques »* www.ssmaritime.com/rijndam-maasdam.htm.
Queen Elisabeth II : www.qe2.org.uk.
- 159 *Train à sustentation magnétique Transrapid.* www.transrapid.de.