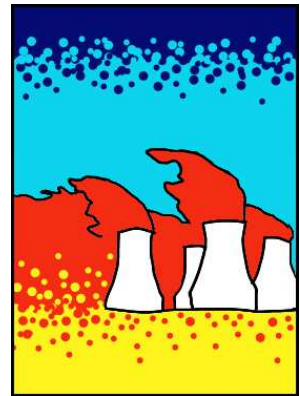


*Troisième partie*

## Chapitres techniques



## A Voitures II

Nous avons estimé précédemment qu'une voiture qui parcourt 100 km consommait environ 80 kWh d'énergie.

Où cette énergie part-elle ? Dans quelle mesure est-ce que cela dépend des caractéristiques de la voiture ? Est-ce que l'on pourrait faire des voitures 100 fois plus efficaces ? Faisons un simple schéma décrivant le déplacement de la voiture, pour voir où l'énergie s'en va.

L'énergie d'une voiture typique qui brûle des combustibles fossiles part principalement dans quatre directions, que nous allons toutes explorer les unes après les autres :

1. l'accélération, et le ralentissement qui utilise les freins ;
2. la résistance de l'air ;
3. la résistance au roulement ;
4. la chaleur — 75 % de l'énergie s'échappe sous forme de chaleur, parce que la chaîne de conversion énergétique a un mauvais rendement.

Au début, notre schéma va négliger la résistance au roulement ; nous prendrons cet effet en compte un peu plus loin dans le chapitre.

Supposons que le conducteur accélère rapidement jusqu'à atteindre la vitesse de croisière  $v$ , puis qu'il maintienne cette vitesse sur une distance  $d$ , qui est la distance entre deux feux de circulation, panneaux stop ou embouteillages. A ce moment-là, il écrase les freins et transforme toute son énergie cinétique en chaleur grâce aux freins. (Ce véhicule ne dispose pas de système sympathique de récupération d'énergie au freinage.) Une fois qu'il peut repartir, il accélère à nouveau jusqu'à atteindre sa vitesse de croisière,  $v$ . Cette accélération fournit de l'énergie cinétique à la voiture ; freiner jette l'énergie cinétique par dessus bord via les freins.

En fait, l'énergie ne part pas que dans les freins : lorsque la voiture se déplace, elle crée des tourbillons dans l'air qui l'entoure. Elle laisse derrière elle un tube d'air tourbillonnant qui se déplace à une vitesse proche de  $v$ . Laquelle de ces deux formes d'énergie est la plus importante : l'énergie cinétique, ou la chaleur dissipée par les freins ? Tâchons de le déterminer.

- La voiture accélère et ralentit une fois par période de temps  $d/v$ . Le rythme auquel de l'énergie est déversée dans les freins est égal à :

$$\frac{\text{énergie cinétique}}{\text{temps entre deux freinages}} = \frac{\frac{1}{2}m_v v^2}{d/v} = \frac{\frac{1}{2}m_v v^3}{d}, \quad (\text{A.1})$$

où  $m_v$  est la masse de la voiture.

- Le tube d'air créé en un temps  $t$  a un volume  $Svt$ , où  $S$  est la surface de la section transversale du tube, qui est semblable à la surface de la vue avant de la voiture. (Pour une voiture aérodynamique,  $S$  est généralement un peu plus petit que la surface frontale  $S_{\text{voiture}}$ , et la



FIGURE A.1. Une Peugeot 206 a un coefficient de traînée ( $C_x$ ) de 0,33 (coefficient appelé aussi, à tort, coefficient de pénétration dans l'air). Photo de Christopher Batt.

La formule-clé pour la plupart des calculs de ce livre est la suivante :

$$\text{énergie cinétique} = \frac{1}{2}mv^2.$$

Par exemple, une voiture de masse  $m = 1\,000$  kg qui se déplace à 100 km par heure, soit  $v = 28$  m/s, a une énergie de

$$\frac{1}{2}mv^2 \simeq 390\,000 \text{ J} \simeq 0,1 \text{ kWh.}$$

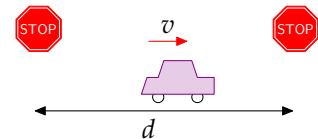
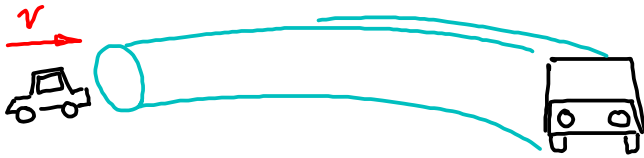


FIGURE A.2. Notre schéma : une voiture se déplace à la vitesse  $v$  entre deux arrêts distants de  $d$ .



part de la surface efficace du tube rapportée à la surface frontale de la voiture est appelée le coefficient de traînée  $c_t$ . Tout au long des équations qui suivent,  $S$  désignera la surface frontale de la voiture,  $c_t S_{\text{voiture}}$ .) Le tube a une masse  $m_{\text{air}} = \rho S v t$  (où  $\rho$  est la densité de l'air) et il tourbillonne en avançant à la vitesse  $v$ ; son énergie cinétique est donc égale à :

$$\frac{1}{2} m_{\text{air}} v^2 = \frac{1}{2} \rho S v t v^2,$$

et le rythme de génération de l'énergie cinétique dans l'air tourbillonnant est de :

$$\frac{\frac{1}{2} \rho S v t v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho S v^3.$$

Le rythme total auquel la voiture produit de l'énergie est donc le suivant :

$$\begin{aligned} \text{puissance qui part dans les freins} &+ \text{puissance qui part dans les tourbillons de l'air} \\ = \frac{1}{2} m_v v^3 / d &+ \frac{1}{2} \rho S v^3. \end{aligned} \tag{A.2}$$

Les deux formes de dissipation d'énergie sont en  $v^3$ . Ce schéma prédit donc qu'un conducteur qui réduit sa vitesse  $v$  de moitié divise sa consommation de puissance par 8. S'il finit par parcourir la même distance en tout, son trajet prendra deux fois plus de temps, mais la quantité totale d'énergie qu'il aura consommée pendant son trajet sera quatre fois plus petite (8 fois moins de puissance consommée, pendant 2 fois plus de temps).

Laquelle de ces deux formes de dissipation d'énergie — les freins ou les tourbillons de l'air — est la plus grande? Cela dépend du rapport :

$$(m_v / d) / (\rho S)$$

Si ce rapport est plus grand que 1, alors il y a plus de puissance qui part dans les freins; s'il est plus petit que 1, alors il y a plus de puissance qui part dans l'air, sous forme de tourbillons. En écrivant différemment ce rapport, on trouve qu'il est supérieur à 1 si :

$$m_v > \rho S d.$$

Ici,  $Sd$  est le volume du tube d'air entre un arrêt et le suivant. Et  $\rho Sd$  est la masse de ce tube d'air. On a donc une situation extrêmement simple : dans l'énergie dissipée totale, l'énergie cinétique qui part dans les freins

FIGURE A.3. Une voiture se déplaçant à la vitesse  $v$  crée derrière elle un tube d'air tourbillonnant; la surface d'une section transversale de ce tube est semblable à la surface frontale de la voiture, et la vitesse à laquelle l'air du tube tourbillonne est à peu près égale à  $v$ .

J'utilise la formule suivante :

masse = densité  $\times$  volume

Le symbole  $\rho$  (lettre grecque 'rho') désigne la densité.

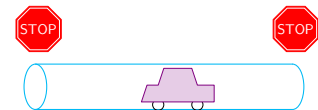


FIGURE A.4. Pour savoir si ce sont les freins ou les tourbillons créés dans l'air qui sont prépondérants dans la consommation d'énergie, on compare la masse de la voiture avec celle du tube d'air entre deux panneaux stop.



FIGURE A.5. La puissance consommée par une voiture est proportionnelle à la surface de sa section transversale sur autoroute, et à sa masse en ville. De ces deux véhicules, devinez lequel a la consommation la plus réduite : la Volkswagen à gauche, ou la navette spatiale à droite ?

est prépondérante si la masse de la voiture est *supérieure* à la masse du tube d'air entre deux arrêts ; l'énergie dissipée en créant des tourbillons dans l'air est prépondérante si la masse de la voiture est *plus petite* que celle du tube d'air (figure A.4).

Déterminons la distance particulière  $d^*$  entre deux arrêts, en dessous de laquelle l'action des freins est prépondérante dans la dissipation d'énergie, et au-dessus de laquelle ce sont les tourbillons de l'air (on dit aussi : la traînée) qui le sont. Si la surface frontale de la voiture est de :

$$S_{\text{voiture}} = 2 \text{ m de large} \times 1,5 \text{ m de haut} = 3 \text{ m}^2$$

que le coefficient de traînée vaut  $c_t = 1/3$ , et que la masse vaut  $m_v = 1\,000 \text{ kg}$ , alors cette distance particulière est de :

$$d^* = \frac{m_v}{\rho c_t S_{\text{voiture}}} = \frac{1\,000 \text{ kg}}{1,3 \text{ kg/m}^3 \times \frac{1}{3} \times 3 \text{ m}^2} = 750 \text{ m.}$$

On en conclut qu'en « conduite en ville », l'énergie cinétique et le freinage sont prépondérants si la distance entre deux arrêts est inférieure à 750 mètres. Dans ces conditions, si vous voulez économiser l'énergie, il vaut mieux :

1. réduire la masse de votre voiture ;
2. avoir une voiture capable de récupérer l'énergie au freinage (ce qui, en gros, divise par deux l'énergie perdue lorsque la voiture freine — voir le chapitre 20) ; et
3. conduire plus lentement.

Lorsque les arrêts sont distants de nettement plus de 750 mètres, la traînée devient prépondérante dans la dissipation d'énergie. Dans ces conditions, la masse de votre voiture importe peu. Et la dissipation d'énergie sera à peu près la même que votre voiture transporte une seule personne ou bien six. Dans ce cas, on peut réduire la dissipation d'énergie :

1. en réduisant le coefficient de traînée de la voiture ;
2. en réduisant la surface de sa section transversale ; ou
3. en roulant moins vite.

La consommation d'énergie réelle de la voiture sera la dissipation d'énergie dans l'équation A.2, poussée à la hausse par un facteur lié à l'inefficacité du moteur et de la transmission. Les voitures à essence typiques ont un

rendement d'environ 25 %. De toute l'énergie chimique qu'une voiture ingurgite, les trois quarts sont gâchés et partent dans le moteur, le radiateur et le pot d'échappement de la voiture ; un quart seulement est de l'énergie « utile » :

$$\text{puissance totale d'une voiture} \simeq 4 \left[ \frac{1}{2} m_v v^3 / d + \frac{1}{2} \rho S v^3 \right].$$

Tâchons de vérifier ce modèle sur les voitures en y injectant quelques chiffres plausibles pour la conduite sur autoroute. Prenons  $v = 110 \text{ km/h} = 31 \text{ m/s}$ , et  $S = c_t S_{\text{voiture}} = 1 \text{ m}^2$ . La puissance consommée par le moteur est estimée en gros à :

$$4 \times \frac{1}{2} \rho S v^3 = 2 \times 1,3 \text{ kg/m}^3 \times 1 \text{ m}^2 \times (31 \text{ m/s})^3 = 80 \text{ kW}.$$

Si vous conduisez la voiture à cette vitesse pendant une heure chaque jour, vous parcourrez alors 110 km et consommerez **80 kWh** d'énergie par jour. En roulant deux fois moins vite durant deux heures par jour, vous parcourrez la même distance en consommant **20 kWh** d'énergie. Ce simple modèle semble cohérent avec les chiffres de kilométrage des voitures que donne le chapitre 3. De plus, ce modèle donne aussi des indications sur la manière dont on peut réduire la quantité d'énergie consommée par votre voiture. Cependant, notre modèle a un petit nombre de défauts que nous allons détailler et corriger dans un instant.

Est-ce qu'il est possible de fabriquer une voiture qui consomme 100 fois moins d'énergie, mais qui serait toujours capable de rouler à 110 km/h ? **Non**. En tout cas, pas si la voiture conserve sa forme actuelle. Sur l'autoroute, à 110 km/h, l'énergie part essentiellement dans la création de tourbillons dans l'air. Utiliser d'autres matériaux pour construire la voiture n'y changerait rien. Il faudrait un miracle pour que les moteurs à combustibles fossiles soient améliorés au point de faire passer leur rendement de 25 % à 50 %, de sorte que la consommation d'énergie des voitures à combustibles fossiles soit réduite jusqu'à environ 40 kWh pour 100 km.

Les véhicules électriques ont pour eux quelques avantages : alors même que le système de stockage d'énergie, par kWh utile stocké, est à peu près 25 fois plus lourd que celui de l'essence, le poids d'un moteur électrique peut être environ 8 fois plus réduit. Et la chaîne énergétique dans une voiture électrique est considérablement plus efficace : les moteurs électriques peuvent atteindre un rendement de 90 %.

Nous reviendrons sur les voitures électriques dans de plus amples détails vers la fin de ce chapitre.

### Les vélos et la question de l'échelle

Voici une question rigolote : quelle est la consommation d'énergie d'un vélo, en kWh pour 100 km ? C'est la même raison qui explique que vous

ÉNERGIE PAR UNITÉ DE DISTANCE	
Voiture à 110 km/h	↔ 80 kWh/100 km
Vélo à 21 km/h	↔ 2,4 kWh/100 km
AVIONS À 900 KM/H	
A380	27 kWh/100 places-km

TABLEAU A.6. Quelques faits : la consommation d'énergie d'une voiture.

COEFFICIENTS DE TRAÎNÉE	
VOITURES	
Honda Insight	0,25
Prius	0,26
Renault 25	0,28
Honda Civic (2006)	0,31
VW Polo GTi	0,32
Peugeot 206	0,33
Ford Sierra	0,34
Audi TT	0,35
Honda Civic (2001)	0,36
Citroën 2 CV	0,51
Cycliste	0,9
Autocar (longue distance)	0,425
AVIONS	
Cessna	0,027
Learjet	0,022
Boeing 747	0,031
SURFACES DE TRAÎNÉE (m <sup>2</sup> )	
Land Rover Discovery	1,6
Volvo 740	0,81
<b>Voiture typique</b>	<b>0,8</b>
Honda Civic	0,68
VW Polo GTi	0,65
Honda Insight	0,47

TABLEAU A.7. Coefficients et surfaces de traînée.

devez dépenser de l'énergie pour avancer à un bon rythme en vélo et en voiture : quand vous avancez, vous créez des tourbillons dans l'air qui vous entoure. On pourrait donc refaire tous les calculs à partir de zéro en remplaçant les chiffres de la voiture par des chiffres valables pour le vélo. Mais il y a un petit truc assez simple que l'on peut utiliser pour trouver la réponse pour le vélo à partir de la réponse pour la voiture. La quantité d'énergie consommée par une voiture, par unité de distance parcourue, est la consommation de puissance associée aux tourbillons créés dans l'air,

$$4 \times \frac{1}{2} \rho S v^3,$$

divisée par la vitesse  $v$ , ce qui fait :

$$\text{énergie par unité de distance} = 4 \times \frac{1}{2} \rho S v^2.$$

Le facteur « 4 » provient du rendement (mauvais) du moteur ;  $\rho$  est la densité de l'air ; la surface  $S = c_t S_{\text{voiture}}$  est la surface frontale efficace de la voiture ; et  $v$  est sa vitesse.

Maintenant, on peut comparer le vélo avec la voiture en divisant  $4 \times \frac{1}{2} \rho S v^2$  pour le vélo par  $4 \times \frac{1}{2} \rho S v^2$  pour la voiture. Toutes les fractions et les  $\rho$  s'annulent, si le rendement du moteur du cycliste qui consomme du carbone est du même ordre que celui du moteur de la voiture qui consomme du carbone (ce qui est effectivement le cas). Le rapport est :

$$\frac{\text{énergie par unité de distance parcourue par le vélo}}{\text{énergie par unité de distance parcourue par la voiture}} = \frac{c_t^{\text{vélo}} S_{\text{vélo}} v_{\text{vélo}}^2}{c_t^{\text{voiture}} S_{\text{voiture}} v_{\text{voiture}}^2}.$$

Le truc que nous allons utiliser s'appelle « la mise à l'échelle ». Si l'on connaît la manière dont évolue la consommation d'énergie en fonction de la vitesse et de la surface frontale, alors on peut facilement prédire la consommation d'énergie d'objets qui ont des vitesses et des surfaces frontales complètement différentes. En l'occurrence, supposons que le rapport entre les surfaces soit de :

$$\frac{S_{\text{vélo}}}{S_{\text{voiture}}} = \frac{1}{4}.$$

(Quatre cyclistes peuvent s'asseoir de front, épaule contre épaule, dans la largeur d'une voiture.) Supposons aussi que le vélo ne soit pas très aérodynamique :

$$\frac{c_t^{\text{vélo}}}{c_t^{\text{voiture}}} = \frac{1}{1/3}$$

Et supposons également que la vitesse du vélo soit de 21 km/h, soit :

$$\frac{v_{\text{vélo}}}{v_{\text{voiture}}} = \frac{1}{5}.$$

On a alors :

$$\begin{aligned} \frac{\text{énergie par unité de distance parcourue par le vélo}}{\text{énergie par unité de distance parcourue par la voiture}} &= \left( \frac{c_t^{\text{vélo}} S_{\text{vélo}}}{c_t^{\text{voiture}} S_{\text{voiture}}} \right) \left( \frac{v_{\text{vélo}}}{v_{\text{voiture}}} \right)^2 \\ &= \left( \frac{3}{4} \right) \times \left( \frac{1}{5} \right)^2 \\ &= \frac{3}{100} \end{aligned}$$

Un cycliste qui roule à 21 km/h consomme donc environ 3 % de l'énergie par kilomètre que consomme un conducteur seul dans sa voiture sur l'autoroute — soit environ **2,4 kWh pour 100 km**.

Donc si vous voulez disposer d'un véhicule dont le rendement du carburant soit 30 fois meilleur que celui d'une voiture, c'est très simple : roulez en vélo.

### Et la résistance au roulement ?

Il y a quelques petites choses que nous avons complètement ignorées jusqu'à présent : l'énergie consommée dans les pneus et la suspension de la voiture ; l'énergie qui part dans le bruit de roulement (celui des roues contre l'asphalte) ; l'énergie qui part dans les crissements de pneus et qui rape leur gomme ; et l'énergie que les véhicules dépensent pour faire trembler le sol. Quand on les prend toutes ensemble, on appelle ces formes de consommation d'énergie la *résistance au roulement*. Le modèle standard de résistance au roulement fait l'hypothèse que la force de la résistance au roulement est tout simplement proportionnelle au poids du véhicule, et qu'elle est indépendante de sa vitesse. La constante de proportionnalité est appelée le coefficient de résistance au roulement,  $C_{rr}$ . Le tableau A.8 en donne quelques valeurs typiques.

Le coefficient de résistance au roulement pour une voiture est d'environ 0,01. La résistance au roulement a juste pour effet d'obliger la voiture à remonter en permanence (et sans frottement) une pente de un pour cent. Les frottements liés au roulement sont donc d'environ 100 newtons par tonne, quelle que soit la vitesse. Vous pouvez le vérifier en poussant une quelconque voiture d'une tonne sur une route horizontale. Une fois que vous avez réussi à la mettre en mouvement, vous verrez que vous pouvez continuer à la faire rouler d'une seule main. (100 newtons, c'est le poids de

roue	$C_{rr}$	TABLEAU A.8. La résistance au roulement est égale à la masse multipliée par le coefficient de résistance au roulement, $C_{rr}$ . La résistance au roulement inclut la force due au fléchissement de la roue, aux pertes de frottement au niveau de l'axe de la roue, aux vibrations et aux tremblements à la fois du revêtement de la route et du véhicule (y compris l'énergie absorbée par les divers absorbeurs de chocs du véhicule), et au dérapage des roues sur la route ou sur les rails. Le coefficient dépend de la qualité de la route, du matériau dont la roue est faite, et de la température. Les chiffres donnés ici supposent que la route est lisse. [2bhu35]
train (acier sur acier)	0,002	
pneu de vélo	0,005	
pneus de camion en caoutchouc	0,007	
pneus de voiture en caoutchouc	0,010	

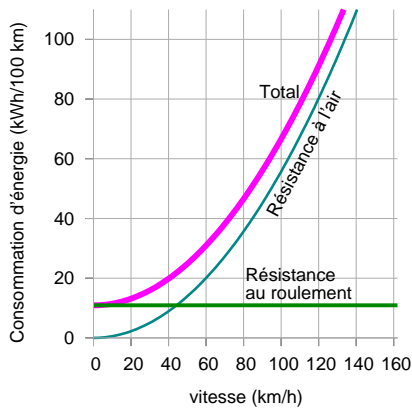


FIGURE A.9. Modèle simple de la consommation de carburant d'une voiture (énergie par unité de distance) qui roule à vitesse constante. Hypothèses : le moteur de la voiture consomme de l'énergie avec un rendement de 0,25, quelle que soit sa vitesse;  $c_t S_{\text{voiture}} = 1 \text{ m}^2$ ;  $m_{\text{voiture}} = 1\,000 \text{ kg}$ ; et  $C_{rr} = 0,01$ .

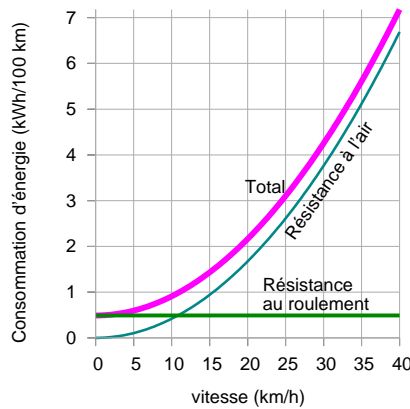


FIGURE A.10. Modèle simple de consommation de carburant d'un vélo (énergie par unité de distance). L'axe vertical représente la consommation d'énergie en kWh pour 100 km. Hypothèses : le moteur du vélo (c'est vous !) consomme de l'énergie avec un rendement de 0,25; la surface de la traînée du cycliste est de  $0,75 \text{ m}^2$ ; la masse du cycliste et de son vélo est de  $90 \text{ kg}$ ; et  $C_{rr} = 0,005$ .

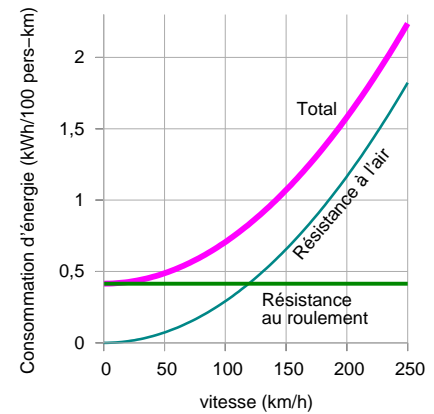


FIGURE A.11. Modèle simple de la consommation d'énergie d'un train, *par passager*, pour un train à huit voitures transportant 584 passagers. L'axe vertical représente la consommation d'énergie en kWh pour 100 pers-km. Hypothèses : le moteur du train consomme de l'énergie avec un rendement de 0,90;  $c_t S_{\text{train}} = 11 \text{ m}^2$ ;  $m_{\text{train}} = 400\,000 \text{ kg}$ ; et  $C_{rr} = 0,002$ .

100 pommes.) A une vitesse de  $31 \text{ m/s}$ , la puissance requise pour vaincre la résistance au roulement, pour un véhicule d'une tonne, est donc de :

$$\text{force} \times \text{vitesse} = (100 \text{ newtons}) \times (31 \text{ m/s}) = 3\,100 \text{ W};$$

ce qui, avec un rendement moteur de 25 %, nécessite 12 kW de puissance en entrée du moteur ; tandis que la puissance nécessaire pour vaincre la traînée a été estimée en page 303 : 80 kW. Par conséquent, à vitesse élevée, environ 15 % de la puissance est requise pour vaincre la résistance au roulement.

La figure A.9 montre le modèle de la consommation de carburant (énergie par unité de distance) comme une fonction de la vitesse constante, en ajoutant la résistance de l'air et au roulement l'une à l'autre.

La vitesse à laquelle la résistance au roulement de la voiture est égale à la résistance de l'air est donnée par :

$$C_{rr} m_v g = \frac{1}{2} \rho c_t S v^2,$$

ce qui fait :

$$v = \sqrt{2 \frac{C_{rr} m_v g}{\rho c_t S}} = 13 \text{ m/s} = 47 \text{ kilomètres par heure.}$$

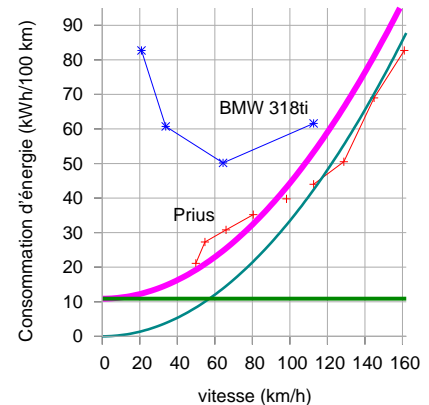


FIGURE A.12. Les consommations de carburant des voitures actuelles n'augmentent pas avec le carré de la vitesse. Les données sur la Prius proviennent de B.Z. Wilson, celles sur la BMW, de Phil C. Stuart. La ligne courbe montre ce à quoi ressemblerait quelque chose qui évolue comme le carré de la vitesse, en supposant une surface de traînée de  $0,6 \text{ m}^2$ .



## Vélos

Pour un vélo ( $m = 90$  kg,  $S = 0,75$  m<sup>2</sup>), le seuil au-delà duquel la résistance de l'air devient prépondérante par rapport à la résistance au roulement se situe à une vitesse d'environ 12 km/h. A une vitesse constante de 20 km/h, le coût du pédalage est d'environ 2,2 kWh pour 100 km. En adoptant une position aérodynamique, le cycliste peut réduire sa traînée, et faire baisser sa consommation d'énergie jusqu'à environ 1,6 kWh pour 100 km.

## Trains

Pour un train de 8 voitures comme celui que montre la figure 20.4 ( $m = 400\,000$  kg,  $S = 11$  m<sup>2</sup>), la vitesse au-dessus de laquelle la résistance de l'air est supérieure à la résistance au roulement est de :

$$v = 33 \text{ m/s} = 119 \text{ kilomètres par heure.}$$

Pour un train à une seule voiture ( $m = 50\,000$  kg,  $S = 11$  m<sup>2</sup>), la vitesse au-dessus de laquelle la résistance de l'air est supérieure à la résistance au roulement est de :

$$v = 12 \text{ m/s} = 42 \text{ kilomètres par heure.}$$

## Lien entre puissance et vitesse

Quand je dis que diviser par deux sa vitesse au volant devrait diviser par quatre la consommation de carburant (en litres aux 100 kilomètres), certaines personnes restent sceptiques. Elles n'ont pas totalement tort : le moteur de la plupart des voitures possède un régime de fonctionnement optimal, et le choix des rapports de boîte sur la voiture fixe les vitesses minimum et maximum entre lesquelles le rendement optimal du moteur peut être atteint. Si ma suggestion de diviser par deux fait rouler la voiture en dehors de cet intervalle de vitesses, alors la consommation pourrait bien ne pas être divisée par quatre. L'hypothèse que j'ai faite implicitement, selon laquelle le rendement du moteur est le même quelles que soient la vitesse et la charge à transporter, conduit à la conclusion qu'il vaut toujours mieux (en termes de nombre de litres consommés par kilomètre) rouler moins vite. Mais si le rendement du moteur s'effondre aux basses vitesses, alors la vitesse la plus économe en énergie peut être une vitesse intermédiaire, qui est un compromis entre le fait de rouler lentement et celui de conserver un régime moteur avec un bon rendement. Dans le cas de la BMW 318ti de la figure A.12, par exemple, la vitesse optimale est d'environ 60 km/h. Mais si la société décidait que les vitesses des voitures doivent impérativement être réduites, rien n'empêcherait de concevoir différemment les moteurs et les boîtes de vitesses, de sorte que le rendement en crête du moteur soit atteint à la bonne vitesse. Comme preuve supplémentaire que

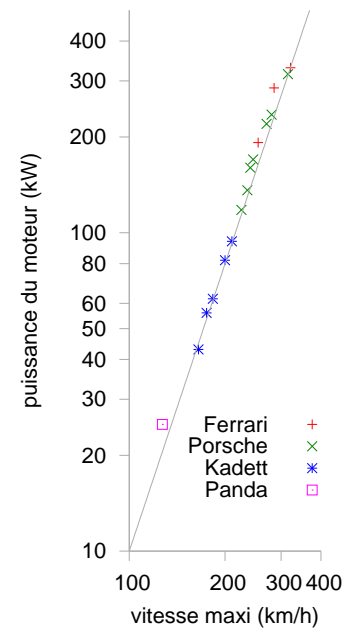


FIGURE A.13. Puissances des voitures (kW) comparées à leurs vitesses de pointe (km/h). Les deux échelles sont logarithmiques. La puissance augmente comme la puissance troisième de la vitesse : pour aller deux fois plus vite, il faut huit fois plus de puissance dans le moteur. Les données proviennent de Tennekes (1997).

la puissance dont une voiture a besoin augmente effectivement comme le cube de la vitesse, la figure A.13 montre une comparaison entre la puissance du moteur et les vitesses de pointe pour toute une série de voitures. La courbe montre la relation de proportionnalité entre la puissance et  $v^3$ .

### Les voitures électriques : l'autonomie est-elle un gros problème ?

Les gens critiquent souvent l'autonomie des voitures électriques, la jugeant insuffisante. Les partisans des voitures électriques répondent régulièrement que « ce n'est pas un problème : il suffit de mettre plus de batteries » — et c'est vrai. Mais il vaudrait mieux expliciter le véritable effet des batteries supplémentaires sur la consommation d'énergie. La réponse dépend largement de la densité d'énergie que les batteries sont supposées fournir : avec une densité d'énergie de 40 Wh/kg (typique des batteries acide-plomb), nous allons voir qu'il est difficile de porter l'autonomie au-delà de 200 ou 300 km ; par contre, avec une densité d'énergie de 120 Wh/kg (typique de nombre de batteries utilisant du lithium), une autonomie de 500 km est assez facile à atteindre.

Supposons que la masse de la voiture et de ses occupants soit de 740 kg, sans aucune batterie. Nous lui ajouterons 100 kg, 200 kg, 500 kg, ou même 1 000 kg de batteries un peu plus loin. Supposons que notre voiture roule à une vitesse typique de 50 km/h ; qu'elle ait une surface de traînée de 0,8 m<sup>2</sup> ; un coefficient de résistance au roulement de 0,01 ; une distance moyenne de 500 m entre deux arrêts ; un rendement moteur de 85 % ; et qu'entre les arrêts et les redémarrages, la récupération d'énergie au freinage permette de récupérer la moitié de l'énergie cinétique de la voiture. On suppose aussi que la recharge des batteries à partir d'une prise de courant se fait avec un rendement de 85 %. La figure A.14 compare le coût du transport de la voiture et son autonomie, en fonction de la quantité de batteries installées à bord. La partie supérieure de la courbe (en bleu) montre le résultat pour une batterie dont la densité d'énergie est de 40 Wh/kg (bonnes vieilles batteries acide-plomb). L'autonomie est limitée par un mur qui se situe un peu au dessus de 500 km. Pour s'approcher de cette autonomie maximum, il faut emporter une quantité de batteries délirante : par exemple, pour atteindre une autonomie de 400 km, il faut 2 000 kg de batteries, et le coût de transport dépasse 25 kWh pour 100 km. Par contre, si l'on se contente d'une autonomie de 180 km, alors on peut s'en sortir avec 500 kg de batteries. La partie inférieure de la courbe de la figure A.14 (en rouge) montre que les choses vont nettement mieux si l'on passe à la technologie des batteries lithium-ion, bien plus légères. Avec une densité d'énergie de 120 Wh/kg, les voitures électriques embarquant 500 kg de batteries peuvent facilement atteindre une autonomie de 500 km. Le coût du transport prévue est alors d'environ 13 kWh pour 100 km.

Il me semble donc que le problème de l'autonomie des voitures électriques a déjà été résolu par l'arrivée des batteries modernes. Bien sûr, ce

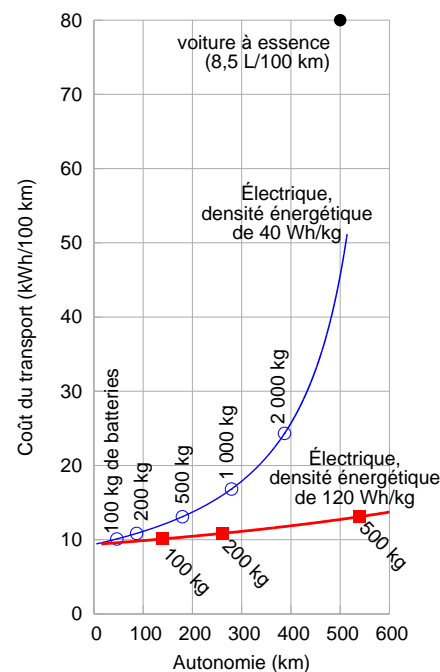


FIGURE A.14. Modèle de l'autonomie des voitures électriques (axe horizontal) et du coût du transport (axe vertical) comme une fonction du poids de batteries, pour deux technologies de batteries. Une voiture avec 500 kg de vieilles batteries avec une densité d'énergie de 40 Wh par kg, a une autonomie de 180 km. Avec le même poids de batteries modernes, fournissant 120 Wh par kg, une voiture électrique peut atteindre une autonomie supérieure à 500 km. Les deux voitures auraient un coût énergétique d'environ 13 kWh pour 100 km. Ces chiffres supposent un rendement de charge de batterie d'environ 85 %.

serait encore mieux si l'on disposait de batteries encore meilleures. Mais une densité d'énergie de 120 Wh par kg est déjà suffisante si l'on accepte d'avoir jusqu'à 500 kg de batteries dans la voiture. En pratique, j'imagine que la plupart des gens se satisferaient même d'une autonomie de 300 km, qu'offrent 250 kg de batteries. Si ces batteries étaient divisées en dix blocs de 25 kg que l'on peut débrancher séparément, alors l'utilisateur d'une voiture pourrait se contenter de conserver quatre de ces dix blocs à bord lors de ses trajets quotidiens entre travail et domicile (100 kg permettent une autonomie de 140 km) ; et il pourrait se procurer six blocs supplémentaires dans une station de recharge de batteries lorsqu'il voudrait faire de plus longs voyages. Lors de ces longs voyages, il pourrait alors échanger ses batteries vides contre un ensemble de batteries pleines à une station d'échange de batteries, à peu près tous les 300 km.

## Notes et bibliographie

Page n°

- 303 *Les voitures à essence typiques ont un rendement d'environ 25 %.* L'encyclopédie Encarta [6by8x] précise que « le rendement d'un bon moteur moderne à cycle Otto varie entre 20 et 25 % ». Le moteur à essence d'une Toyota Prius, célèbre pour avoir un des moteurs de voiture les plus efficaces, utilise un cycle Atkinson au lieu du cycle Otto ; la puissance-crête qu'il génère est de 52 kW (70 chevaux) et son rendement est de 34 % lorsqu'il fournit 10 kW [348whs]. Le moteur Diesel le plus efficace au monde a un rendement de 52 %, mais il n'est pas vraiment utilisable dans une voiture : il pèse 2 300 tonnes. Le moteur turbo-Diesel Wärtsilä-Sulzer RTA96-C (figure A.15) est destiné aux navires porte-conteneurs, et la puissance qu'il développe est de 80 MW.
- 302 *La récupération d'énergie au freinage divise en gros par deux l'énergie perdue lorsque la voiture freine.* Source : E4tech (2007).
- 303 *Les moteurs électriques peuvent être environ 8 fois plus petits que les moteurs à essence.* Un moteur 4-temps à essence a un rapport puissance/poids d'environ 0,75 kW/kg. Les meilleurs moteurs électriques ont un rendement de 90 %, et un rapport puissance/poids de 6 kW/kg. Remplacer un moteur à essence de 75 kW par un moteur électrique de même puissance économise 85 kg. Malheureusement, le rapport puissance/poids des batteries est d'environ 1 kW par kg ; donc ce que le véhicule électrique gagne sur le moteur, il le perd avec les batteries.
- 306 *Le moteur du vélo consomme de l'énergie avec un rendement de 0,25.* Cette hypothèse faite sur le vélo, ainsi que toutes les autres, sont confirmées par di Prampero et al. (1979). La surface de traînée d'un cycliste en position de course est de  $c_t S = 0,3 \text{ m}^2$ . La résistance au roulement d'un cycliste sur un vélo de course de très bonne qualité (poids total : 73 kg) est de 3,2 N.
- *Figure A.12.*  
Les données sur la Prius proviennent de B. Z. Wilson [7zw1pmt]. Les données sur la BMW proviennent de Phil C. Stuart [d8cydbx].



FIGURE A.15. Le moteur Diesel 2-temps Wärtsilä-Sulzer RTA96-C et ses 14 cylindres. Il fait 27 mètres de long et 13,5 mètres de haut. [www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)

Pour en savoir plus : Gabrielli et von Kármán (1950).