

## Consommation automobile et économies d'énergie

Durée : 2h

- 1) Quelles sont les différentes formes d'énergie en jeu dans le processus de déplacement d'une voiture?
- R.1)** L'énergie chimique (combustion air + carburant), énergie mécanique des pistons transmise aux roues, énergie cinétique de la voiture, et chaleur (frottements, moteur).
- 2) Faire une liste des pertes énergétiques, en expliquant brièvement l'origine de la dissipation d'énergie.
- R.2)** le freinage par lequel le conducteur transforme l'énergie cinétique de la voiture en chaleur ; la résistance de l'air ; la résistance au roulement ; les pertes thermiques (chaleur dégagée par le moteur) qui sont intégrées dans le rendement du moteur : c'est la fraction de l'énergie chimique qui n'est pas convertie en énergie mécanique des pistons.

**Identification des mécanismes dominants :** On considère un déplacement simple supposé constitué 1 ) d'une phase de démarrage et d'accélération assez rapide, jusqu'à atteindre une vitesse  $v$ , 2 ) d'une phase de déplacement à la vitesse  $v$  constante sur une distance  $d$ , et 3 ) d'une phase de freinage et d'arrêt.

- 3) Exprimer l'énergie cinétique  $E_c$  fournie par le moteur au moment de la phase 1), qui sera ensuite dissipée par freinage pendant la phase 3). On notera  $m_v$  la masse de la voiture. Comment réduire cette consommation d'énergie ?

**R.3)**

$$E_c = \frac{1}{2} m_v v^2$$

On peut réduire ce terme en conduisant moins vite et un véhicule moins lourd.

- 4) Dans l'air, pour les dimensions et les vitesses que nous considérons ici, la force de frottement (*traînée*) est donnée par la formule :

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho_a S C_x v^2$$

où  $S$  est l'aire de la section de la voiture et  $C_x$  un coefficient de traînée (sans dimension) décrivant le caractère plus ou moins aérodynamique du véhicule.

Quelle énergie  $E_{air}$  doit être fournie par le moteur pendant la phase 2) pour compenser cette force de traînée ? Comment réduire cette consommation d'énergie ?

**R.4)** On obtient cette énergie comme le travail de  $F_{air}$  sur la distance  $d$  :

$$E_{air} = \frac{1}{2} \rho_a S C_x v^2 d$$

Ce terme sera diminué en réduisant la vitesse et le coefficient de traînée du véhicule (et bien sûr en réduisant la distance parcourue mais c'est un autre problème).

Remarque : dans ce calcul, on suppose à chaque fois qu'il n'y a qu'une personne par véhicule. Évidemment, il serait plus efficace d'en faire voyager plusieurs ensemble. Les besoins baissent considérablement si on rassemble de nombreuses personnes dans un même véhicule, tout en augmentant assez peu  $S$  : ça s'appelle un train, ou un bus.

- 5) *Origine de la force de traînée.* On peut considérer que, lorsque la voiture se déplace, elle entraîne également une masse d'air  $m_a$  à la vitesse  $v$  (sous la forme d'un écoulement turbulent en aval). Le volume du tube ainsi déplacé vaut  $d \times S_{air}$ , où  $S_{air}$  représente la section du tube. Cette section est liée à la surface frontale de la voiture  $S_v$ , mais ne lui est pas strictement égale. On décrit ceci en introduisant le coefficient de traînée  $C_x$  de sorte que  $S_{air} = S_v \times C_x$ .

Exprimer le volume de l'air traversé pendant un temps de trajet  $t$  en fonction de  $v$ ,  $t$ ,  $S_v$  et  $C_x$ . En déduire l'énergie transmise à l'air au cours du trajet et montrer qu'on retrouve la force de traînée. Comparer les pertes énergétiques par freinage et par résistance à l'air et en déduire que les résistances par freinage deviennent dominantes lorsque  $m_v > m_a$ .

- 6) Montrer que l'on peut introduire une distance critique  $d_c$  telle que  $E_{air}/E_c = d/d_c$ . Calculer  $d_c$  et expliquer à quoi correspondent les régimes de trajet  $d < d_c$  et  $d > d_c$ . On prendra  $\rho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $m_v = 1,4 \text{ t}$  (véhicule de masse à vide 1,25 t - c'est la moyenne en France - transportant 2 passagers),  $C_x = 0,33$  et  $S = 2,7 \text{ m}^2$  (valeurs typiques pour une voiture).

**R.6)**

$$\frac{E_{air}}{E_c} = \frac{\rho_a S C_x v^2 d}{m_v v^2} = \frac{d}{d_c}$$

où  $d_c = m_v / (\rho_a S C_x)$  (et ce, de manière indépendante de  $v$ ).

A.N. avec  $S = 2,7 \text{ m}^2$ ,  $C_x = 1/3$  et  $m_v = 1,4 \text{ t}$  :  $d_c = 1,3 \text{ km}$ . Pour les déplacements plus courts (typiquement : en ville), la dépense d'énergie correspond principalement à mettre en mouvement le véhicule. Pour les déplacements plus longs, il s'agit surtout de vaincre les frottements de l'air.

- 7) Il faut aussi prendre en compte, malgré une contribution plus faible, la résistance au roulement qui intègre le frottement de la gomme des pneus sur la route, la dissipation de l'énergie par les suspensions de la voiture, etc. Le modèle le plus simple pour l'évaluation de ces pertes fait l'hypothèse que la résistance est simplement de la forme  $\mu m_v g$ , où  $\mu$  est un coefficient de l'ordre de 0,01.

Exprimer le travail  $E_{roul}$  de la résistance au roulement sur le trajet.

**R.7)**  $E_{roul} = \mu m_v g d$

**Question complémentaire : rôle d'un léger relief.** Même sur terrain plat, la route n'est jamais parfaitement plate. Supposons qu'elle se compose d'une suite de montées et de descentes de pente  $\alpha = 1 \%$ . La vitesse est maintenue constante (défense d'accélérer dans les descentes). Calculer l'énergie fournie par le moteur pendant les montées sur un trajet de longueur totale  $d$  (cette énergie étant dissipée sous forme de freinage pendant les descentes). Exprimer cette énergie en fonction de  $E_{roul}$ . On constate que cette énergie peut être significative, par contre elle ne modifie pas qualitativement la discussion, c'est pourquoi elle ne sera pas incluse dans la suite.

- R.7)** Pour une montée de longueur  $x$ , l'élévation est de  $\alpha x$  donc il faut fournir l'énergie potentielle  $m_v g \alpha x$ . Sur une distance totale  $d$ , la moitié du trajet se fait en montée, l'énergie totale à fournir est donc  $m_v g \alpha d / 2$ .

On observe que cette énergie est égale à  $E_{roul} \times (\alpha / 2f) = E_{roul} / 2$  : pour nos valeurs numériques, l'énergie liée à la pente est la moitié de celle liée à la résistance au roulement - on peut donc modifier facilement tous les calculs ultérieurs pour l'intégrer.

**Long trajet :** on considère un "long trajet" typique sur une distance  $d = 100 \text{ km}$  (on note que  $d \gg d_c$ ).

- 8) Calculer l'énergie  $E_{long}$  à fournir pour ce trajet, supposé effectué à 130 km/h.

**R.8)** On calcule  $C_x v^2 \rho_a S / 2 = 667 \text{ J/m}$  et  $f m_v g = 140 \text{ J/m}$  (c'est bien le frottement de l'air qui domine) donc, sur 100 km,  $E_{long} = 81 \text{ MJ}$ .

- 9) Sachant que la teneur énergétique de l'essence est d'environ 10 kWh/litre, et que les rendements maximum<sup>1</sup> obtenus (à forte charge) sont de l'ordre de 35% pour un moteur essence (et de 40% pour un moteur Diesel), calculer la consommation du véhicule dans ces conditions.

<sup>1</sup>On rappelle que le rendement maximum théorique d'un cycle moteur idéal vaut :  $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c}$  avec  $T_f$  la température de la source froide et  $T_c$  la température de la source chaude.

**R.9)** 1 litre d'essence fournit  $10000 \times 3600 \times 0,35 = 12,6$  MJ d'énergie mécanique. Le véhicule a donc consommé  $81/12,6 = 6,4$  L pour 100 km. C'est une valeur très réaliste : les véhicules récents consomment environ 5-6 L/100 km, contre 7 L/100 km pour un véhicule vendu il y a 20 ans.

10) Le même trajet est maintenant parcouru à 110 km/h. Quelle économie d'énergie est réalisée ?

**R.10)** La contribution  $E_{air}$  est modifiée tandis que  $E_{roul}$  reste inchangée. Au final, on trouve  $E_{long} = 62$  MJ, soit une économie de 23 %. On peut éventuellement calculer le temps perdu en roulant à une vitesse plus faible : il est de seulement 8 mn.

11) Il est possible d'optimiser la forme de la voiture afin de diminuer, dans une certaine mesure, son coefficient de traînée. Par exemple, celui de la Toyota Prius est  $C_x \simeq 0,25$ . Quelle économie d'énergie est alors réalisée ?

**R.11)** De nouveau, la contribution  $E_{air}$  est modifiée tandis que  $E_{roul}$  reste inchangée. On trouve  $E_{long} = 64$  MJ, soit une économie de 21 %.

Si en plus on pose  $v = 110$  km/h, on descend à 50 MJ soit une économie totale de 39 %.

Remarque : on peut trouver un copieux tableau de valeurs dans l'article *Automobile drag coefficient* de Wikipedia. Globalement les véhicules commercialisés les plus efficaces descendent à 0,19-0,20, ce sont des modèles de luxe assez récents.

**Trajet court :** examinons maintenant l'énergie mécanique  $E_{court}$  à fournir pour un "trajet court" typique, défini comme un trajet de longueur totale 5 km, effectué à 40 km/h, avec 10 arrêts (feux, stops etc).

12) Les différents termes contribuant à  $E_{court}$  sont du même ordre (la distance  $d/10$  entre deux arrêts n'est pas très éloignée de  $d_c$ ) si bien qu'on ne peut en négliger aucun. Calculer  $E_c$ ,  $E_{air}$  et  $E_{roul}$  et en déduire  $E_{court}$ .

**R.12)** On calcule  $E_c = 85$  kJ pour un démarrage (à multiplier par 10),  $E_{air} = 310$  kJ et  $E_{roul} = 700$  kJ si bien que  $E_{court} = 1,85$  MJ.

Si on incluait le rôle du léger relief décrit dans la question complémentaire, sachant qu'il vaut  $E_{roul}/2$ , on monterait jusqu'à 2,2 MJ.

13) Entre 1990 et 2022, la masse moyenne des voitures vendues en France est passée d'environ 0,9-1,05 t à 1,25 t. Si on prenait  $m_v = 1$  t, quelle économie serait réalisée sur  $E_{court}$  ?

**R.13)** Les deux termes  $E_c$  et  $E_{roul}$  sont modifiés et on trouve finalement  $E_{court} = 1,4$  MJ, soit une économie de 24 %.

Si on prenait en compte le relief dans notre calcul, on monterait à 1,65 MJ, l'économie réalisée serait de 25 %.

NB on ferait aussi une économie sur  $E_{long}$ , mais plus faible : 4 MJ soit 5 %.

### Empreinte carbone :

14) En posant des ordres de grandeur raisonnables sur le nombre de "trajets courts" et la distance totale de "trajets longs" réalisés en voiture par an, et sachant que pour une conduite sur un cycle "urbain", impliquant des faibles charges (c'est-à-dire des utilisations fréquentes mais courtes), le rendement du moteur est plutôt de l'ordre de 15%, estimer la consommation d'essence par personne et par an.

**R.14)** En posant 4 trajets courts par jour et 2000 km de trajet long par an, on est sûrement assez proche de la vérité puisque (cf données sur le site Datalab du Ministère de la transition écologique) 1 ) les "trajets longs" (> 100 km) étaient en moyenne de 5000 km par personne de plus de 15 ans en 2016, dont 40 % du kilométrage en voiture (et 43 % en avion, 13 % en train) et 2 ) en 2019, 9300 km ont été parcourus en voiture au total par personne.

On en déduit pour les trajets longs  $6,4 \text{ L}/100 \text{ km} \times 2000 \text{ km} = 130 \text{ L}$  et pour les trajets courts  $4 \times 365 \times 1,85 \text{ MJ}/(36 \text{ MJ/L} \times 0,15) = 500 \text{ L}$ , et donc au total  $630 \text{ L/an}$ . On voit que ce sont les trajets courts qui contribuent le plus, d'où l'importance de développer des alternatives sans voiture à ces déplacements.

Remarques :

On peut noter que la distance médiane domicile-travail était de  $12,5 \text{ km}$  en milieu rural et  $6,1 \text{ km}$  en milieu urbain en 2019, alors qu'elle était resp. de  $8,1$  et  $4,8 \text{ km}$  en 1999 : l'amélioration du rendement des moteurs est peut-être un élément, mais les difficultés du marché du travail en sont sans doute un autre très important.

L'hypothèse que les  $2000 \text{ km}$  de trajets longs sont parcourus sur autoroute est sans doute un peu forte, une large partie est sans doute parcourue à vitesse nettement plus faible.

A  $1,9 \text{ euros/L}$  d'essence, le budget par personne serait de  $1200 \text{ euros/an}$ , ce qui est beaucoup par rapport à la dépense moyenne d'un *foyer* périurbain de  $1400 \text{ euros/an}$ .

- 15) On donne  $1 \text{ litre d'essence} \leftrightarrow 0,75 \text{ kgC}$ . En déduire une estimation des émissions de gaz à effet de serre annuelles d'un automobiliste.
- R.15) On calcule donc  $1 \text{ litre d'essence} \leftrightarrow 2,75 \text{ kgCO}_2$  et donc  $1,73 \text{ tCO}_2$  par an pour un automobiliste, ce qui est un ordre de grandeur raisonnable.
- 16) En reprenant tous les calculs précédents, estimer la baisse d'émissions pour un automobiliste circulant à vitesse réduite ( $110 \text{ km/h}$  sur autoroute), avec un véhicule plus léger ( $1 \text{ t}$ ) et plus aérodynamique ( $C_x = 0,25$ ). Cette baisse est-elle significative ?
- R.16) Dans ces conditions,  $E_{long} = 46 \text{ MJ}$  et pour les trajets courts on calcule  $E_c = 60 \text{ kJ}$  pour un démarrage (à multiplier par 10),  $E_{air} = 230 \text{ kJ}$  et  $E_{roul} = 500 \text{ kJ}$  si bien que  $E_{court} = 1,3 \text{ MJ}$ . On arrive donc à  $130 \text{ L/an}$  pour les trajets longs et  $350 \text{ L/an}$  pour les trajets courts, soit au total  $480 \text{ L/an}$  : baisse de  $150 \text{ L/an}$ , soit  $24 \%$ , ce qui correspond à  $410 \text{ kgCO}_2$  : ce n'est pas du tout négligeable par rapport à l'empreinte totale, qui était de  $9 \text{ tCO}_2$  e par personne en France en 2019.
- 17) Notre automobiliste achète une voiture électrique. Sachant que l'énergie stockée dans une batterie de voiture est restituée avec environ  $15 \%$  de pertes, et qu'en France le facteur d'émission de la production électrique est de  $75 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$ , quelle est maintenant l'empreinte annuelle de notre automobiliste ?
- 18) Si l'on prend en compte l'énergie grise associée à la fabrication, amenant à une empreinte de  $6,6 \text{ tCO}_2\text{e}$  pour une voiture électrique contre  $3,7 \text{ tCO}_2\text{e}$  pour une voiture essence, le choix d'une voiture électrique est-il avantageux du point de vue des émissions carbone ?
- R.18) Il faut maintenant fournir l'énergie mécanique  $81 \times 20 + 4 \times 365 \times 1,85 = 4,3 \text{ GJ} = 1,2 \text{ MWh}$ . L'énergie électrique à fournir est donc  $1,2 \text{ MWh}/0,85 = 1,4 \text{ MWh}$ , ce qui représente  $75 \text{ kgCO}_2\text{e}$  - c'est franchement négligeable par rapport au véhicule à moteur thermique.

A supposer qu'on ait le choix entre voiture électrique ou essence, la différence d'énergie grise de la première est donc rentabilisée au bout de 3 ans.

Remarque totalement anecdotique :  $1,2 \text{ MWh/an}$  à  $0,21 \text{ euros par kWh} = 250 \text{ euros/an}$  soit une économie de l'ordre de  $1000 \text{ euros}$  par rapport au véhicule essence ; il faut donc encore attendre assez longtemps quand même pour rentabiliser l'achat d'un point de vue financier (Renault Zoé à partir de  $35\,000 \text{ euros}$  par exemple).

On a vu que la voiture électrique permet de baisser drastiquement l'empreinte du véhicule à l'usage, mais il reste l'empreinte grise ( $0,6 \text{ tCO}_2\text{e/an}$  s'il est amorti sur 10 ans) et le coût financier de l'achat, et aussi la question de la disponibilité des matériaux, de la souveraineté industrielle etc.

**Conclusion :** *les calculs de cet exercice donnent des valeurs assez réalistes de la consommation énergétique d'une voiture à essence (et pour une diesel les valeurs seraient proches). On voit que des baisses d'émissions significatives peuvent être réalisées sans développements technologiques nouveaux - de l'ordre d'un quart pour les changements décrits ici, ce qui est important mais pas suffisant par rapport aux objectifs de la transition écologique. Quels moyens proposer pour aller au-delà ?*