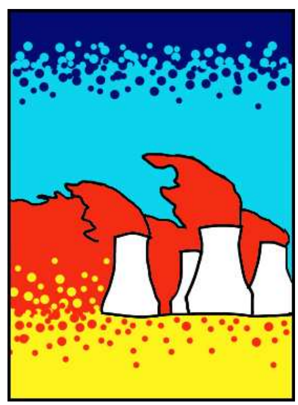
Troisième partie

Chapitres techniques



C Avions II

Ce que nous devons faire, c'est chercher comment on peut rendre les voyages aériens plus économes en énergie, et développer de nouveaux carburants pour consommer moins d'énergie et émettre moins de CO_2.

Tony Blair

Espérer que les choses iront pour le mieux n'est pas une stratégie, c'est une illusion.

Emily Armistead, Greenpeace

Quelles sont les limites fondamentales des voyages par la voie des airs ? La physique du vol exige-t-elle la consommation inévitable d'une certaine quantité d'énergie, par tonne, par kilomètre parcouru ? Jusqu'à quelle distance maximale un Boeing 747 de 300 tonnes peut-il voler ? Qu'en est-il pour une barge rousse de 1 kg ou une sterne arctique de 100 g ?

Tout comme le chapitre 3, dans lequel nous avons estimé la consommation des voitures, était suivi du chapitre A, qui modélise comment les voitures consomment cette énergie, ce chapitre complète le chapitre 5, et examine où part l'énergie consommée par les avions. Les seules notions de physique requises sont les lois de Newton sur le mouvement, que je décrirai quand nous en aurons besoin.

Cette discussion nous permettra de répondre à des questions telles que « les voyages aériens consommeraient-ils moins d'énergie avec des avions à hélices plus lents ? » Il y aura plein d'équations : j'espère que vous les aimez !

FIGURE C.1. Quelques oiseaux : deux sternes arctiques, une barge rousse, et un Boeing 747.

Comment voler dans les airs

Les avions (et les oiseaux) se déplacent dans de l'air. Tout comme les voitures et les trains, ils subissent donc une force de friction (appelée « traînée »), et une bonne partie de l'énergie engloutie par un avion sert à propulser l'avion contre cette force. De plus, et contrairement aux voitures ou aux trains, les avions dépensent de l'énergie *pour rester en l'air*.

Les avions restent en l'air en envoyant de l'air vers le bas. Quand l'avion pousse l'air vers le bas, l'air pousse l'avion vers le haut (parce que c'est ce que la troisième loi de Newton lui dit de faire). Tant que cette poussée vers le haut, qui est qualifiée de portance, est assez élevée pour compenser le poids de l'appareil qui l'attire vers le bas, l'avion reste en l'air.

Quand l'avion rejette de l'air vers le bas, il donne à cet air de l'énergie cinétique. Créer de la portance exige donc de l'énergie. La puissance totale dont l'avion a besoin est la somme de la puissance requise pour générer la portance, et de la puissance requise pour compenser la traînée ordinaire. (Soit dit en passant, la puissance requise pour générer la portance est sou-

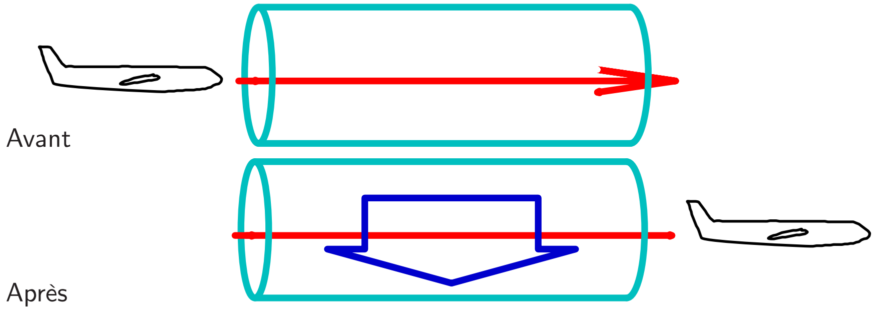


FIGURE C.2. Un avion rencontre un tube d'air stationnaire. Une fois l'avion passé, l'air a été envoyé vers le bas par l'avion. La force exercée par l'avion sur l'air pour l'accélérer vers le bas est égale et opposée à la force exercée sur l'avion par l'air.

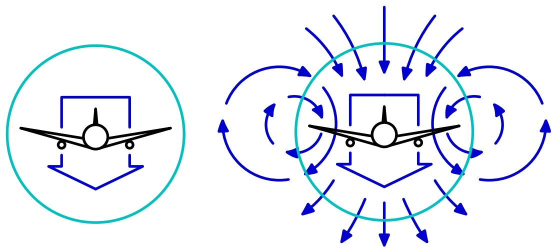


FIGURE C.3. Notre schéma considère que l'avion laisse une saucisse d'air en mouvement vers le bas dans son sillage. Une représentation plus réaliste implique un flux tourbillonnant complexe. Pour le voir en vrai, regardez la figure C.4.

vent appelée « traînée induite ». Mais je l'appellerai puissance de portance, P_{portance}.)

Les deux équations dont nous aurons besoin pour construire une théorie du vol aérien, sont la seconde loi de Newton :

$$\text{force} = \text{taux de variation de la quantité de mouvement}, \tag{C.1}$$

et la troisième loi de Newton, que je viens juste de mentionner :

$$\text{force exercée par A sur B} = -\text{ force exercée par B sur A}. \tag{C.2}$$

Si vous n'aimez pas les équations, je peux en vous donner dès maintenant la conclusion : nous allons établir que la puissance requise pour générer la portance est *égale* à la puissance requise pour compenser la traînée. Donc le fait de devoir « rester en l'air » *multiplie par deux* la puissance nécessaire.

Faisons un schéma de la force de portance agissant sur un avion se déplaçant à la vitesse v. Pendant l'intervalle de temps t, l'avion parcourt la distance vt et laisse derrière lui une saucisse d'air se déplaçant vers le bas (figure C.2). Nous appellerons S_s la surface de la section transversale de cette saucisse. Le diamètre de cette saucisse est à peu près égal à l'envergure w de l'avion. (A l'intérieur de cette grande saucisse on trouve une plus petite saucisse d'air turbulent correspondant à la surface frontale du corps de l'avion.) En réalité, les détails du flux d'air sont beaucoup plus intéressants que cette représentation en saucisse : l'extrémité de chaque aile laisse derrière elle un tourbillon, l'air entre les extrémités d'aile se déplace rapidement vers le bas, tandis que l'air au-delà des extrémités d'aile (à l'extérieur) se déplace vers le haut (figures C.3 et C.4). Cet air qui monte est exploité par les oiseaux qui volent en formation : juste après la pointe d'une aile d'oiseau, on trouve un léger courant ascendant. Mais revenons à notre saucisse.

La masse de la saucisse est de :

$$m_{\text{saucisse}} = \text{densité} \times \text{volume} = \rho v t S_{\text{s}}. \tag{C.3}$$

Mettons que la saucisse tout entière se déplace vers le bas à la vitesse u, et calculons la valeur de u pour laquelle l'avion subit une force de portance égale à son poids mg. La quantité de mouvement créé vers le bas de la saucisse pendant l'intervalle t est de :

$$\text{masse} \times \text{vitesse} = m_{\text{saucisse}} u = \rho v t S_{\text{s}} u. \tag{C.4}$$

Et d'après les lois de Newton, ceci doit être égal à la quantité de mouvement induite par le poids de l'avion pendant le temps t, à savoir :

$$mgt. \tag{C.5}$$

A partir de cette équation,

$$\rho v t S_{\text{s}} u = mgt, \tag{C.6}$$

nous pouvons déduire la vitesse requise de la saucisse :

$$u = \frac{mg}{\rho v S_{\text{s}}}.$$

Intéressant ! La vitesse de la saucisse est *inversement* proportionnelle à la vitesse v de l'avion. Un avion qui va lentement doit renvoyer de l'air vers le bas plus vigoureusement qu'un avion rapide, parce qu'il rencontre moins d'air par unité de temps. C'est la raison pour laquelle les avions doivent déployer leurs volets lors de l'atterrissage : allant lentement, il leur faut une aile plus large et plus pentue pour dévier plus d'air.

Quel est le coût énergétique pour envoyer la saucisse vers le bas à la vitesse u ? L'énergie requise est de :

$$\begin{aligned} P_{\text{portance}} &= \frac{\text{énergie cinétique de la saucisse}}{\text{durée}} && \text{(C.7)} \\ &= \frac{1}{t} \times \frac{1}{2} m_{\text{saucisse}} u^2 && \text{(C.8)} \\ &= \frac{1}{2t} \rho v t S_{\text{s}} \left(\frac{mg}{\rho v S_{\text{s}}} \right)^2 && \text{(C.9)} \\ &= \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v S_{\text{s}}}. && \text{(C.10)} \end{aligned}$$

La puissance totale nécessaire pour que l'avion avance est la somme de la puissance de traînée et de la puissance de portance :

$$\begin{aligned} P_{\text{totale}} &= P_{\text{traînée}} + P_{\text{portance}} && \text{(C.11)} \\ &= \frac{1}{2} c_{\text{t}} \rho S_{\text{a}} v^3 + \frac{1}{2} \frac{(mg)^2}{\rho v S_{\text{s}}}, && \text{(C.12)} \end{aligned}$$

FIGURE C.4. Les flux d'air dans le sillage d'un avion. Photo du Langley Research Center de la NASA.

où S_a est la surface frontale de l'avion et c_t est son coefficient de traînée (comme dans le chapitre A).

Le rendement de l'avion, exprimé comme la quantité d'énergie consommée par unité de distance parcourue, serait égal à :

$$\left.\frac{\text{énergie}}{\text{distance}}\right|_{\text{idéale}} = \frac{P_{\text{totale}}}{v} = \frac{1}{2}c_t\rho S_a v^2 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s}, \tag{C.13}$$

si l'avion transformait l'énergie de son carburant en puissance de traînée et en puissance de portance de façon parfaitement efficace. (Soit dit en passant, un autre nom pour « énergie par unité de distance parcourue » est la « force », et l'on peut interpréter les deux termes ci-dessus comme la force de traînée $\frac{1}{2}c_t\rho S_a v^2$ et la force liée à la portance $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s}$. Leur somme est la force appelée « poussée », qui correspond précisément à l'effort que doivent fournir les moteurs.)

Dans la réalité, les réacteurs ont un rendement d'environ $\epsilon = 1/3$, et donc l'énergie par unité de distance d'un avion se déplaçant à la vitesse v est de :

$$\frac{\text{énergie}}{\text{distance}} = \frac{1}{\epsilon}\left(\frac{1}{2}c_t\rho S_a v^2 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s}\right). \tag{C.14}$$

Cette expression de l'énergie par unité de distance est assez compliquée. Mais elle peut largement se simplifier si l'on suppose que l'avion est *conçu* pour voler à la vitesse qui *minimise* l'énergie par unité de distance. Car, voyez-vous, on constate qu'il existe une valeur de v minimisant l'énergie par unité de distance (figure C.5). La somme des deux quantités $\frac{1}{2}c_t\rho S_a v^2$ et $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s}$ est minimale quand ces deux valeurs sont égales. Ce phénomène est délicieusement récurrent en physique et en ingénierie : deux choses qui, a priori, n'ont pas de *raison* d'être égales, s'*avèrent* finalement être *effectivement* égales, ou bien égales à un facteur deux près.

Ce principe d'égalité nous dit donc que la vitesse optimale pour l'avion est telle que :

$$c_t\rho S_a v^2 = \frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s}, \tag{C.15}$$

soit :

$$\rho v_{\text{opt}}^2 = \frac{mg}{\sqrt{c_t S_a S_s}}, \tag{C.16}$$

Ceci définit la vitesse optimale si notre représentation schématique du vol aérien est fidèle ; ce schéma ne l'est plus si le rendement du moteur ϵ varie de façon significative en fonction de la vitesse, ou si la vitesse de l'avion dépasse la vitesse du son (330 m/s) ; au delà de la vitesse du son, il nous faut un modèle différent pour la traînée et la portance.

Testons notre modèle en regardant la vitesse optimale prédite pour un 747 et pour un albatros. Nous devons faire attention à prendre la bonne valeur pour la densité de l'air : si nous voulons estimer la vitesse de croisière

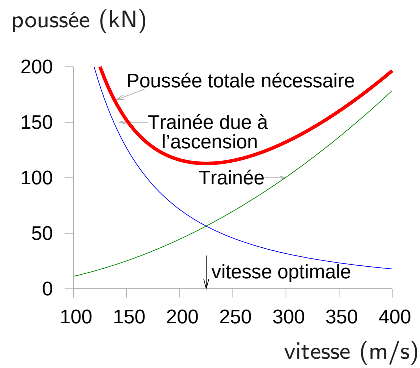


FIGURE C.5. La force requise pour qu'un avion se déplace, en fonction de sa vitesse v, est la somme d'une force de traînée ordinaire $\frac{1}{2}c_t\rho S_a v^2$ — laquelle augmente avec la vitesse — et de la force liée à la portance (aussi connue sous le nom de traînée induite) $\frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s}$ — laquelle décroît avec la vitesse. Il y a une vitesse idéale, v_{optimale}, pour laquelle la force requise est minimale. Une force représente de l'énergie par unité de distance, donc en minimisant la force, on minimise aussi la quantité de carburant par distance. Pour optimiser le rendement du carburant, il faut voler à v_{optimale}. Ce graphique nous montre schématiquement la poussée nécessaire, en kilonewtons, pour un Boeing 747 de masse 319 tonnes, d'envergure 64,4 mètres, de coefficient de traînée égal à 0,03 et de surface frontale 180 m^2, se déplaçant dans un air de densité $\rho = 0,41$ kg/m^3 (la densité à une altitude de 10 km), en fonction de sa vitesse v en m/s. Notre schéma a une vitesse optimale $v_{\text{optimale}} = 220$ m/s (800 km/h). Pour un schéma basé sur des saucisses, il reflète bien la réalité !

Oiseau		747	Albatros
Concepteur		Boeing	sélection naturelle
Masse (à pleine charge)	m	363 000 kg	8 kg
Envergure	w	64,4 m	3,3 m
Surface⋆	S_a	180 m^2	$0,09$ m^2
Densité	ρ	$0,4$ kg/m^3	$1,2$ kg/m^3
Coefficient de traînée	c_t	0,03	0,1
Vitesse optimale	v_{opt}	220 m/s = 790 km/h	14 m/s = 50 km/h

Tableau C.6. Estimation de la vitesse optimale pour un jumbo jet et un albatros.
⋆ Surface frontale estimée pour le 747 en prenant la largeur de la cabine (6,1 mètres) multipliée par la hauteur estimée du corps (10 mètres) et en multipliant par deux pour tenir compte de la surface frontale des moteurs, des ailes et de la queue ; pour l'albatros, surface frontale estimée à partir d'une photographie.

optimale pour un 747 volant à 10 000 mètres, nous devons nous rappeler que la densité de l'air diminue quand l'altitude z augmente selon la formule $\exp(-mgz/kT)$, où m est la masse des molécules de diazote et de dioxygène, et kT est l'énergie thermique (la constante de Boltzmann multipliée par la température absolue). La densité est environ 3 fois plus faible à cette altitude.

Les vitesses optimales que nous obtenons (tableau C.6) sont étonnamment proches des valeurs réelles ! La vitesse optimale prédite pour le 747 est de 790 km/h, et celle de l'albatros, 50 km/h — tous deux très proches des véritables vitesses de croisière de ces deux oiseaux (900 km/h pour le premier et entre 48 et 88 km/h pour le second).

Explorons d'autres prédictions de notre scénario. Nous pouvons vérifier que la force (C.13) est compatible avec la poussée connue d'un 747. En nous souvenant qu'à la vitesse optimale, les deux forces sont égales, il nous faut juste en prendre une et la multiplier par deux :

$$\text{force} = \left.\frac{\text{énergie}}{\text{distance}}\right|_{\text{idéale}} = \frac{1}{2}c_t\rho S_a v^2 + \frac{1}{2}\frac{(mg)^2}{\rho v^2 S_s} \qquad (C.17)$$

$$= c_t\rho S_a v_{opt}^2 \qquad (C.18)$$

$$= c_t\rho S_a \frac{mg}{\rho(c_t S_a S_s)^{1/2}} \qquad (C.19)$$

$$= \left(\frac{c_t S_a}{S_s}\right)^{1/2} mg. \qquad (C.20)$$

Définissons le facteur de remplissage f_S comme le rapport des surfaces :

$$f_S = \frac{S_a}{S_s}. \qquad (C.21)$$

(On peut se représenter f_S comme la fraction du carré occupé par l'avion dans la figure C.7). Alors :

$$\text{force} = (c_t f_S)^{1/2}(mg). \qquad (C.22)$$

Intéressant ! La poussée requise est indépendante de la densité du fluide au travers duquel l'avion vole, et elle est tout simplement une constante

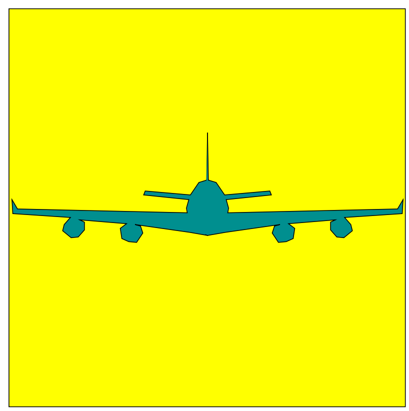


Figure C.7. Vue frontale d'un Boeing 747, utilisée pour estimer l'aire frontale S_a de l'avion. La surface du carré est S_s (l'envergure au carré).

sans dimension $(c_t f_S)^{1/2}$ fois le poids de l'avion. Cette constante, soit dit en passant, est connue sous le nom de « rapport portance sur traînée » de l'avion. (Le rapport portance sur traînée est aussi connu sous le nom de *finesse* ; le tableau C.8 en indique quelques valeurs typiques.)

En prenant les valeurs du jumbo jet, $c_t \simeq 0,03$ et $f_S \simeq 0,04$, on trouve que la poussée requise est de :

$$(c_t f_S)^{1/2}\, mg = 0,036\, mg = 130 \text{ kN}. \tag{C.23}$$

Cela est-il en accord avec la fiche technique d'un 747 ? En fait, chacun des 4 moteurs peut fournir une poussée maximale de 250 kN, mais cette poussée maximale ne sert que pour le décollage. En croisière, la poussée est bien moindre : pour un 747, elle est de 200 kN, soit 50 % de plus que ce que notre schéma a suggéré. Notre schéma est tombé un peu à côté, parce que notre estimation du rapport portance sur traînée était un peu basse.

Cette poussée peut être utilisée directement pour en déduire le rendement du transport obtenu pour n'importe quel avion. Nous pouvons calculer deux sortes de rendement : le coût énergétique pour faire voyager du *fret*, mesuré en kWh par tonne-kilomètre ; et le coût énergétique pour déplacer des gens, mesuré en kWh pour 100 passagers-kilomètres.

Airbus A320	17
Boeing 767-200	19
Boeing 747-100	18
Sterne commune	12
Albatros	20

TABLEAU C.8. Rapports portance sur traînée.

FIGURE C.9. Cessna 310N : 60 kWh par 100 passagers-km. Un Cessna 310 Turbo transporte 6 passagers (incluant 1 pilote) à la vitesse de 370 km/h. Photographie par Adrian Pingstone.

Rendement du transport de fret

La poussée est une force, et une force est une énergie par unité de distance. L'énergie totale consommée par le moteur est plus grande d'un facteur $(1/\epsilon)$, où ϵ est le rendement du moteur, que nous considérerons valoir 1/3.

Voici le coût brut du transport, défini comme l'énergie par unité de masse (de l'appareil entier) et de distance :

$$\text{coût du transport} = \frac{1}{\epsilon} \times \frac{\text{force}}{\text{masse}} \tag{C.24}$$

$$= \frac{1}{\epsilon} \times \frac{(c_t f_S)^{1/2}\, mg}{m} \tag{C.25}$$

$$= \frac{(c_t f_S)^{1/2}}{\epsilon} g. \tag{C.26}$$

Ainsi, le coût du transport est simplement une valeur sans dimension (relative à la forme de l'avion et au rendement des moteurs), multipliée par g, l'accélération due à la gravité. Remarquez que ce coût brut du transport s'applique à tous les avions, mais ne dépend que de trois propriétés simples de l'avion : son coefficient de traînée, sa forme et le rendement de son moteur. Il ne dépend ni de la taille de l'avion, ni de sa masse, ni de la densité de l'air. En y insérant le rendement $\epsilon = 1/3$ du moteur, et en considérant un rapport portance sur traînée égal à 20, nous trouvons que le coût brut du transport de *n'importe quel* avion, selon notre schéma, est de :

$$0,15\ g$$

soit de :

$$0,4\ \text{kWh/tonne-km.}$$

Peut-on améliorer les avions ?

Si le rendement des moteurs ne peut être qu'un tout petit peu amélioré par les avancées technologiques à venir, et si la forme des avions a déjà atteint la quasi-perfection, alors on ne peut pas faire grand chose pour cette valeur sans dimension. L'efficacité du transport aérien est proche de sa limite physique. La communauté des aérodynamiciens nous dit que la forme des avions peut être encore un peu améliorée en passant à des carlingues avec aile fusionnée, et que le coefficient de traînée pourrait être réduit grâce au contrôle du flux laminaire, c'est-à-dire en réduisant l'accroissement de la turbulence au-dessus de l'aile en aspirant un peu d'air à travers de petites perforations dans sa surface (Braslow, 1999). L'ajout du contrôle du flux laminaire aux avions existants améliorerait de 15 % le coefficient de traînée, et le passage à une forme à aile fusionnée devrait l'améliorer de 18 % (Green, 2006). Et puisque l'équation C.26 nous dit que le coût du transport est proportionnel à la racine carrée du coefficient de traînée, des améliorations de 15 % ou 18 % de c_t aboutiraient à une amélioration du coût du transport de, respectivement, 7,5 % et 9 %.

Ce coût de transport brut est le coût énergétique pour déplacer du poids, *y compris le poids de l'avion lui-même*. Pour estimer l'énergie nécessaire pour transporter du fret par avion, par unité de poids de fret, nous devons la diviser par la fraction qui constitue la cargaison. Par exemple, si un 747 version cargo, plein, a environ 1/3 de sa masse sous forme de fret, alors le coût du transport est de :

$$0,45\ g,$$

ou environ 1,2 kWh/tonne-km. Ce n'est que légèrement supérieur au coût du transport par camion, qui est de 1 kWh/tonne-km.

FIGURE C.10. « Attachez vos ceintures. » Un Bombardier Learjet 60XR, qui transporte 8 passagers à 780 km/h, a un coût de transport de 150 kWh pour 100 passagers-km. Photographie par Adrian Pingstone.

Rendement du transport de personnes

De façon similaire, nous pouvons estimer l'efficacité du transport de passagers d'un 747.

$$\begin{aligned}
&\text{Rendement du transport (passager–km par litre de carburant)}\\
&= \text{nombre de passagers} \times \frac{\text{quantité d'énergie par litre}}{\frac{\text{poussée}}{\epsilon}} && \text{(C.27)}\\
&= \text{nombre de passagers} \times \frac{\epsilon \times \text{quantité d'énergie par litre}}{\text{poussée}} && \text{(C.28)}
\end{aligned}$$

$$= \quad 400 \times \frac{1}{3} \times \frac{38 \text{ MJ/litre}}{200\,000 \text{ N}} \qquad \text{(C.29)}$$
$$= \quad 25 \text{ passager–km par litre} \qquad \text{(C.30)}$$

Ce qui est un peu plus efficace qu'une voiture typique avec un seul occupant (12 km par litre). Le voyage par avion présente donc un meilleur rendement énergétique que la voiture s'il n'y a qu'une ou deux personnes dans la voiture ; mais les voitures sont plus efficaces si elles contiennent trois passagers ou plus.

Points clés

Nous avons parcouru un bon bout de chemin ! Récapitulons les points clés. La moitié de l'effort fourni par l'avion lui sert à *rester en l'air* ; l'autre moitié lui sert à *avancer*. Nous avons trouvé que le rendement en carburant à la vitesse optimale, exprimé sous forme d'une énergie par unité de distance parcourue, se trouve dans la force (C.22), et qu'il était tout simplement proportionnel à la masse de l'avion. La constance de proportionnalité est le rapport portance sur traînée, qui est déterminé par la forme de l'avion. Donc, alors qu'un abaissement de la vitesse limite des voitures réduirait l'énergie consommée par unité de distance parcourue, il n'y a pas lieu d'envisager des limitations de vitesse pour les avions. Les avions actuellement en vol ont des vitesses optimales, différentes pour chaque avion, dépendantes de leur poids, et ils vont déjà à leur vitesse optimale. Si vous donniez à l'avion l'ordre de ralentir, sa consommation énergétique *augmenterait*. La seule façon de rendre l'avion plus économe est de le poser au sol et de l'arrêter. Les avions ont déjà été optimisés de manière fantastique, et il n'y a aucune amélioration significative de leur efficacité en vue. (Voir les pages 44 et 157 pour une discussion plus approfondie de la notion selon laquelle les nouveaux superjumbos seraient « bien plus efficaces » que les vieux jumbos ; et page 43 pour une discussion de la notion selon laquelle les turbopropulseurs sont « bien plus efficaces » que les moteurs à réaction).

FIGURE C.11. Boeing 737-700 : 30 kWh pour 100 passagers-km. Photographie © Tom Collins.

Rayon d'action

Une autre prédiction que nous pouvons faire, c'est celle du rayon d'action d'un avion ou d'un oiseau — la plus longue distance qu'il peut parcourir sans refaire le plein. Peut-être pensez-vous qu'un avion plus gros peut aller plus loin, mais la prédiction de notre modèle est étonnamment simple. Le rayon d'action d'un avion, c'est-à-dire la distance maximale qu'il peut parcourir avant de devoir se ravitailler, est proportionnel à sa vitesse et à l'énergie totale du carburant, et il est inversement proportionnel au rythme auquel l'avion engloutit ce carburant :

$$\text{rayon d'action} = v_{\text{opt}} \frac{\text{énergie}}{\text{puissance}} = \frac{\text{énergie} \times \epsilon}{\text{force}}. \qquad \text{(C.31)}$$

Or l'énergie totale du carburant est égale à sa valeur calorifique, C (en joules par kilogramme), multipliée par sa masse ; et la masse du carburant est une fraction $f_{\text{carburant}}$ de la masse totale de l'avion. Ainsi :

$$\text{rayon d'action} = \frac{\text{énergie} \times \epsilon}{\text{force}} = \frac{Cm\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_{\text{t}} f_{\text{S}})^{1/2}(mg)} = \frac{\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_{\text{t}} f_{\text{S}})^{1/2}} \times \frac{C}{g}. \quad \text{(C.32)}$$

Il est difficile d'imaginer une prédiction plus simple : le rayon d'action de tout oiseau ou avion est le produit d'un facteur sans dimension $\left(\frac{\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_{\text{t}} f_{\text{S}})^{1/2}}\right)$ qui prend en compte le rendement du moteur, le coefficient de traînée et la géométrie de l'oiseau, et d'une distance fondamentale,

$$\frac{C}{g},$$

qui est une propriété du carburant et de la gravité, et rien d'autre. Pas de taille, pas de masse, pas de longueur, pas de largeur de l'oiseau ; pas de dépendance à la densité du carburant.

Mais alors, c'est quoi, cette distance magique ? Cette distance est la même que le carburant soit de la graisse d'oie ou du kérosène : ces deux carburants sont essentiellement constitués d'hydrocarbures $(CH_2)_n$. Le kérosène a une valeur calorifique $C = 40$ MJ par kg. La distance associée au kérosène est de :

$$d_{\text{carburant}} = \frac{C}{g} = 4\,000 \text{ km}. \quad \text{(C.33)}$$

Le rayon d'action de l'oiseau de métal est la portée intrinsèque du carburant, 4 000 km, multipliée par un facteur $\left(\frac{\epsilon f_{\text{carburant}}}{(c_{\text{t}} f_{\text{S}})^{1/2}}\right)$. Si notre oiseau a un moteur au rendement de $\epsilon = 1/3$ et un rapport portance sur traînée de $(c_{\text{t}} f_{\text{S}})^{1/2} \simeq 1/20$, et si presque la moitié de notre oiseau est constitué de carburant (un 747 une fois le plein fait, c'est 46 % de kérosène), nous trouvons que tous les oiseaux et avions, quelle que soit leur taille, ont le même rayon d'action : à peu près trois fois la distance du carburant — en gros 13 000 km.

Là encore, ce chiffre est proche de la réalité : le record de vol sans escale pour un 747 (établi les 23 et 24 mars 1989) est de 16 560 km de distance.

De plus, cette affirmation selon laquelle le rayon d'action est indépendant de la taille de l'oiseau est étayée par l'observation que des oiseaux de toutes tailles, des grandes oies aux délicates hirondelles et aux sternes arctiques, migrent sur des distances intercontinentales. Le vol sans escale le plus long jamais enregistré pour un oiseau — en l'occurrence, une barge rousse — était long de 11 000 km.

Quelle distance Steve Fosset a-t-il parcourue dans son avion en matériaux composites, le Virgin Atlantic GlobalFlyer modèle 311 ? 41 467 km. [33ptcg] C'était un avion un peu spécial : 83 % de son poids au décollage était du carburant ; le vol a exploité les vents dominants d'altitude

Vous pouvez voir $d_{\text{carburant}}$ comme la distance à laquelle le carburant se jetterait s'il convertissait brutalement toute son énergie chimique en énergie cinétique et se lançait lui-même sur une trajectoire parabolique, sans résistance de l'air. [Pour être précis, la distance atteinte avec la parabole optimale est le double de C/g.] Cette distance est aussi la hauteur *verticale* à laquelle le carburant se lancerait sans résistance de l'air. Une autre chose amusante que l'on peut remarquer est que la valeur calorifique du carburant C, que j'ai donnée en joules par kilogrammes, est aussi une vitesse mise au carré (tout comme le rapport énergie-sur-masse E/m, dans l'équation d'Einstein $E = mc^2$, est une vitesse au carré, c^2) : 40×10^6 J par kg fait $(6\,000 \text{ m/s})^2$. On peut donc considérer la graisse ainsi : « la graisse est égale à 6 000 mètres par seconde ». Si vous voulez perdre du poids en faisant du jogging, 6 000 m/s (22 000 km/h) est la vitesse qui vous permettra de tout perdre en un seul bond de géant.

pour augmenter sa distance. Fragile, cet avion a connu plusieurs pannes en route.

Notre schéma nous amène aussi au point intéressant qui suit : si nous nous posons la question « quelle est la densité d'air optimale pour voler ? », nous trouvons que la *poussée* requise (C.20) à la vitesse optimale est indépendante de la densité. Donc, notre avion schématique serait tout aussi heureux quelle que soit l'altitude ; il n'y a pas de densité optimale. L'avion réalise le même nombre de kilomètres par litre de carburant quelle que soit la densité ; mais la *vitesse* optimale, elle, dépend de la densité ($v^2 \sim 1/\rho$, équation (C.16)). Donc, toutes choses égales par ailleurs, la durée de voyage de notre avion schématique serait la plus courte en volant dans un air aussi peu dense que possible. En fait, le rendement d'un moteur réel n'est pas indépendant de la vitesse et de la densité de l'air. Notre avion s'allégeant en brûlant son carburant, notre schéma nous dit que sa vitesse optimale à une densité donnée diminue ($v^2 \sim mg/(\rho(c_t S_a S_s)^{1/2})$). Donc un avion qui voyage dans un air de densité constante devrait ralentir un peu alors qu'il s'allège. Mais un avion peut à la fois voler à une *vitesse constante* tout en continuant à sa vitesse *optimale* s'il augmente son altitude afin de réduire la densité de l'air. Lors de votre prochain vol long-courrier, vous pourrez vérifier si le pilote augmente son altitude de croisière de, disons, 31 000 pieds au début jusqu'à 39 000 pieds vers la fin du vol.

Comment un avion à l'hydrogène s'en sortirait-il ?

Nous sommes déjà arrivés à la conclusion que le rendement du vol aérien, en terme de quantité d'énergie par tonne-km, est une simple constante sans dimension que multiplie g. Changer de carburant ne va pas modifier cette conclusion fondamentale. S'intéresser aux avions à hydrogène vaut sans doute le coup si l'on veut réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Ils pourraient aussi avoir un rayon d'action amélioré. Mais n'espérez pas qu'ils soient radicalement plus efficaces sur le plan énergétique.

Pistes d'amélioration du rendement des avions

Voler en formation, comme le font les oies, pourrait aboutir à un gain de 10 % de rendement du carburant (car le rapport portance sur traînée de la formation est supérieur à celui d'un avion isolé), mais bien sûr, cette astuce ne fonctionne que pour les oies désireuses de migrer vers la même destination au même moment.

Optimiser la longueur des sauts : les avions très-long courrier (conçus pour avoir un rayon d'action dans les 15 000 km) ont un rendement un peu inférieur à des avions moyen-courrier, car ils doivent transporter plus de carburant, ce qui laisse moins de place pour le fret et les passagers. Il serait énergétiquement plus rentable de faire des sauts de puce avec des avions à plus courte portée. La distance idéale étant d'environ 5 000 km, les voyages longue-distance comporteraient donc un ou deux arrêts pour refaire le plein (Green, 2006). Les vols longue-distance à étapes multiples pourraient avoir un rendement amélioré d'environ 15 % ; mais bien sûr, cela impliquerait d'autres coûts.

Les aéroplanes éco-compatibles

A l'occasion, vous avez certainement entendu parler de gens qui auraient construit un aéroplane écologiquement correct. Et pourtant, plus tôt dans ce chapitre, notre schéma nous a conduit à affirmer que le coût de transport de *n'importe* quel avion est d'environ :

$$0,4 \text{ kWh/tonne-km}.$$

Selon ce schéma, les seules possibilités d'améliorer significativement ce chiffre pour un avion serait de réduire la résistance à l'air (par exemple, grâce à une astuce du genre aspirateur-dans-les-ailes) ou de changer la géométrie de l'avion (en le faisant plus ressembler à un planeur, avec des ailes immensément larges comparées au fuselage, voire en se débarrassant carrément du fuselage).

Regardons de plus près les annonces récentes sur « l'aviation éco-compatible » et voyons si l'un de ces avions parvient à battre notre référence de 0,4 kWh par tonne-km. Si un avion utilise moins que 0,4 kWh par tonne-km, nous devrions conclure que notre schéma comporte une erreur.

FIGURE C.12. L'Electra F-WMDJ : 11 kWh pour 100 p-km. Photo par Jean-Bernard Gache. `www.apame.eu`

L'Electra, un monoplace en bois et en tissu, a fait un vol de 50 km en 48 minutes autour des Alpes du sud le 23 décembre 2007 [`6r32hf`]. L'Electra a une envergure de 9 mètres et un moteur électrique de 18 kW alimenté par 48 kg de batteries lithium-polymère. Le poids de l'appareil au décollage est de 265 kg (134 kg pour l'appareil, 47 kg de batteries et 84 kg de cargaison humaine). En supposant que la densité énergétique de la batterie était de 130 Wh/kg, et que le vol a consommé 90 % d'une pleine charge (5,5 kWh), le coût de transport a été d'environ :

$$0,4 \text{ kWh/tonne-km},$$

ce qui colle exactement avec notre schéma. Cet avion électrique n'a pas un besoin énergétique moindre de celui d'une pompe à combustible fossile standard.

Bien sûr, ce n'est pas pour autant que les avions électriques ne sont pas intéressants. Si l'on pouvait remplacer les avions traditionnels par des alternatives consommant autant d'énergie mais sans émission de carbone, ce serait indubitablement une technologie utile. Et, en tant que transport de personnes, l'Electra atteint une consommation tout à fait respectable de 11 kWh pour 100 p-km, ce qui est similaire celle d'une voiture électrique dans notre diagramme des transports en page 152. Mais dans ce livre, on en revient toujours à ce problème fondamental : « d'où l'énergie vient-elle ? »

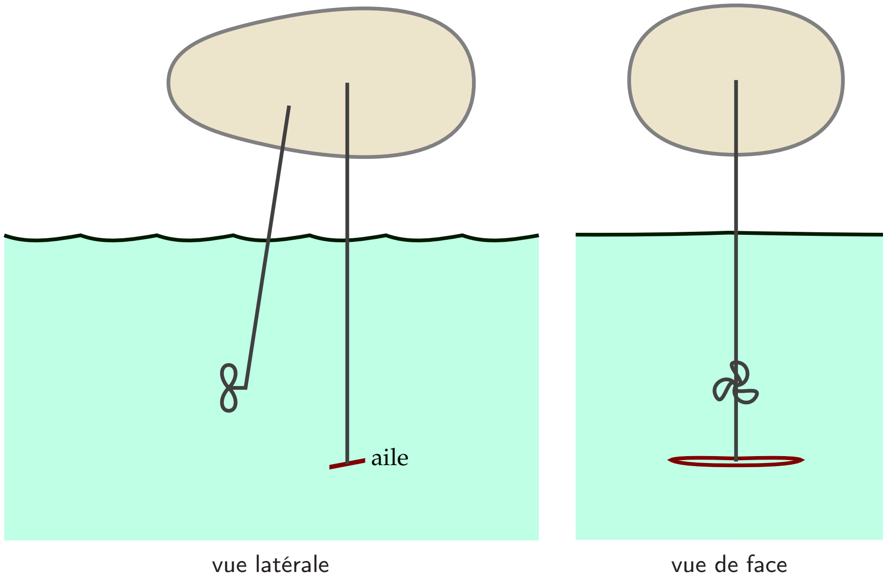


FIGURE C.13. Hydroptère. Photographie par Georgios Pazios.

De nombreux bateaux sont aussi des oiseaux

Quelque temps après avoir rédigé ce schéma sur le vol aérien, j'ai réalisé qu'il s'appliquait aussi à d'autres oiseaux que ceux en l'air : il s'applique aux hydroptères, ainsi qu'à d'autres embarcations rapides ; bref, à tous ceux qui s'élèvent au-dessus de l'eau quand ils se déplacent.

La figure C.13 nous montre le principe de l'hydroptère. La masse de l'embarcation est supportée par une aile submergée inclinée, qui peut être fort petite comparée à la coque. Cette aile génère de la portance en rejetant un fluide vers le bas, tout comme l'avion de la figure C.2. En admettant que la traînée soit dominée par la friction sur l'aile, et que les dimensions de l'aile et la vitesse du navire aient été optimisées pour minimiser l'énergie dépensée par unité de distance, alors le meilleur coût de transport possible, au sens de la quantité d'énergie par tonne-kilomètre, sera pile celle de l'équation C.26 :

$$\frac{(c_t f_S)^{1/2}}{\epsilon} g, \tag{C.34}$$

où c_t est le coefficient de traînée de l'aile immergée, f_S est le rapport de surfaces sans dimension défini précédemment, ϵ est le rendement du moteur, et g l'accélération due à la gravité.

Il se peut que les valeurs de c_t et de f_S ne soient pas tout à fait les mêmes que celles d'un aéroplane optimisé. Mais un point remarquable de cette théorie est l'absence de dépendance de la densité du fluide à travers lequel l'aile vole. Et donc, nous pouvons prédire, à la louche, que le coût du transport (énergie par unité de distance et de masse, en incluant la masse du véhicule) d'un hydroptère est *le même* que le coût de transport d'un avion ! A savoir, environ 0,4 kWh par tonne-km.

Pour des navires qui effleurent la surface de l'eau, tels que des catamarans à grande vitesse ou des skieurs nautiques, un schéma correct devrait aussi inclure l'énergie qui sert à produire des vagues, mais je soupçonne que cette théorie de l'hydroptère reste à peu près valide.

Je n'ai pas encore trouvé des données sur le coût de transport d'un hydroptère, mais certains chiffres pour un catamaran transportant des passagers à 41 km/h semblent en assez bon accord : il consomme environ 1 kWh par tonne-km.

J'ai été tout à fait surpris d'apprendre qu'un voyageur au long cours qui saute d'une île à l'autre en avion ne se contente pas d'aller plus vite que celui qui ferait le voyage par bateau — il consomme aussi probablement moins d'énergie.

D'autres façons de rester en l'air

Les aérostats

Ce chapitre a mis en lumière le fait que l'on ne peut pas rendre les avions plus économes en les ralentissant, parce que tout le bénéfice d'une moindre résistance de l'air serait plus qu'annulé par le fait de devoir rejeter plus fortement de l'air vers le bas. Pourrait-on résoudre ce problème en changeant de stratégie : au lieu de rejeter de l'air vers le bas, peut-on être aussi léger que l'air ? Un aérostat, zeppelin ou dirigeable utilise un énorme ballon rempli d'hélium, qui est plus léger que l'air, pour compenser le poids de sa petite cabine. L'inconvénient de cette stratégie est que cet énorme ballon augmente considérablement la résistance à l'air du véhicule.

Afin de limiter le coût énergétique (par unité de masse et de distance) de l'aérostat, il faut aller lentement, ressembler à un poisson, et être très grand et long. Faisons un petit schéma de l'énergie requise par un aérostat idéalisé.

Je vais supposer que le ballon est un ellipsoïde, avec une surface transversale S et une longueur L. Le volume est $V = \frac{2}{3}SL$. Si le dirigeable flotte stabilisé dans de l'air de densité ρ, la masse totale du vaisseau, y compris sa cargaison et son hélium, doit être égale à $m_{\text{totale}} = \rho V$. S'il se déplace à la vitesse v, la force de résistance de l'air est de :

$$F = \frac{1}{2} c_t S \rho v^2, \qquad \text{(C.35)}$$

où c_t est le coefficient de traînée, que l'on peut estimer être aux alentours de 0,03 en se fondant sur les aéroplanes. L'énergie dépensée par unité de distance est égale à F divisé par le rendement ϵ des moteurs. Donc le coût brut du transport — la quantité d'énergie consommée par unité de

FIGURE C.14. L'USS Akron (ZRS-4), long de 239 mètres, au-dessus de Manhattan. Il pesait 100 tonnes et pouvait transporter 83 tonnes. La puissance totale de ses moteurs était de 3,4 MW, et il pouvait transporter un équipage de 89 personnes et un chargement d'armes à 93 km/h. Il servait aussi à transporter des avions.

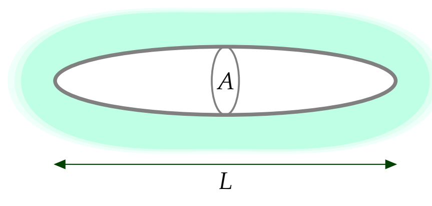


FIGURE C.15. Un dirigeable ellipsoïdal.

distance et de masse — est égal à :

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{totale}}} = \frac{\frac{1}{2}c_t S\rho v^2}{\epsilon\rho\frac{2}{3}SL} \quad (C.36)$$

$$= \frac{3}{4\epsilon}c_t\frac{v^2}{L} \quad (C.37)$$

Voilà un résultat plutôt sympathique ! Le coût de transport brut de cet aérostat idéalisé ne dépend que de sa vitesse v et de sa longueur L, et ni de la densité de l'air ρ, ni de la surface frontale du vaisseau S.

Ce schéma peut aussi être appliqué sans modification à des sous-marins. Le coût de transport brut (en kWh par tonne-km) d'un dirigeable est pile celui d'un sous-marin de même longueur et de même vitesse. Le sous-marin contiendra une masse 1 000 fois supérieure, puisque l'eau est 1 000 fois plus dense que l'air ; et cela coûtera 1 000 fois plus d'énergie de le faire bouger. La seule différence entre les deux sera le revenu publicitaire.

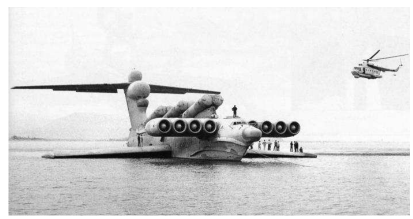
Maintenant, voyons un peu ce que donnent les chiffres. Supposons que nous voulions voyager à 80 km/h (de manière à ce que la traversée de l'Atlantique prenne trois jours). En unités du système international, cela fait 22 m/s. Supposons que le rendement ϵ soit égal à 1/4. Afin d'obtenir le meilleur coût de transport possible, quel est le plus long dirigeable que nous puissions envisager ? Le Hindenburg était long de 245 mètres. En prenant $L = 400$ mètres, nous trouvons un coût du transport égal à :

$$\frac{F}{\epsilon m_{\text{totale}}} = 3 \times 0,03 \times \frac{(22\ \text{m/s})^2}{400\ \text{m}} = 0,1\ \text{m/s}^2 = 0,03\ \text{kWh/t-km}.$$

Si la cargaison utile représentait la moitié de la masse du vaisseau, le coût net du transport de cet aérostat monstre serait de 0,06 kWh/t-km — similaire à celui du rail.

Les ékranoplanes

Un ékranoplane, ou vaisseau ailé volant au ras des vagues, est un aéronef à effet de sol : un appareil qui vole très près de la surface de l'eau, ce qui lui permet d'obtenir sa portance non pas en projetant de l'air vers le bas comme un avion, ou en projetant de l'eau vers le bas comme un hydroptère, mais en s'appuyant sur un coussin d'air pris en sandwich entre ses ailes et la proche surface. Vous pouvez démontrer cet effet de sol en lançant une carte à jouer au ras d'une table plane. Maintenir ce coussin d'air requiert très peu d'énergie, et donc un appareil à effet de sol, en termes énergétiques, se comporte largement comme un véhicule de surface sans résistance au roulement. Sa principale dépense énergétique est associée à la résistance de l'air. Rappelez-vous que pour un avion, la moitié de la dépense d'énergie est associée à la résistance de l'air, et l'autre moitié au rejet de l'air vers le bas.



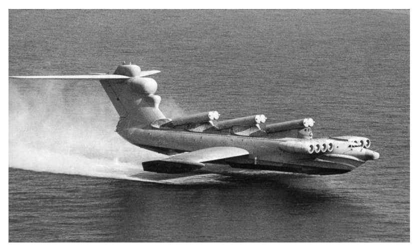


FIGURE C.16. Le Lun, un ékranoplane — un peu plus long et lourd qu'un Boeing 747.
Photographies : A. Belyaev.

L'Union Soviétique a développé l'ékranoplane sous l'ère Krouchtchev en tant que transport militaire et lance-missiles. Le Lun pouvait se déplacer à 500 km/h, et la poussée totale de ses huit moteurs était de 1 000 kN, bien que ce total ne soit plus nécessaire une fois que le vaisseau s'était élevé au-dessus de l'eau. En supposant que la poussée en vitesse de croisière était un quart du maximum, que le rendement des moteurs était de 30 %, et que sur sa masse de 400 tonnes, il y avait 100 tonnes de cargaison, alors ce véhicule avait un coût net de transport de fret de 2 kWh par tonne-km. J'imagine que s'il était optimisé pour le transport de fret non militaire, l'ékranoplane pourrait avoir un coût de transport de fret environ moitié de celui d'un avion ordinaire.

Légendes urbaines

Le vol était programmé de toute façon, et donc le fait que je prenne l'avion était énergétiquement neutre.

Ceci est faux pour deux raisons. Premièrement, votre poids supplémentaire fait consommer plus d'énergie par l'avion pour vous garder en l'air. Deuxièmement, les compagnies aériennes répondent à la demande en faisant voler plus d'avions.

Notes et bibliographie

Page n°

321 *Boeing 747.* Le coefficient de traînée du 747 est tiré de `www.aerospaceweb.org`. Les autres données sur le 747 proviennent de [`2af5gw`]. Les informations sur l'albatros viennent de [`32judd`].

– *Dans la réalité, les réacteurs ont un rendement d'environ $\epsilon = 1/3$.* Les rendements typiques des moteurs sont de l'ordre de 23 à 36 % [`adg.stanford.edu/aa241/propulsion/sfc.html`]. Pour un avion typique, le rendement global du moteur va de 20 à 40 %, les meilleurs réacteurs à double flux atteignant 30 à 37 % en vitesse de croisière [`www.grida.no/climate/ipcc/aviation/097.htm`]. Cependant, vous ne pouvez pas forcément choisir le moteur ayant le meilleur rendement, car il se peut qu'il soit plus lourd (je veux dire par là que sa masse pourrait être plus élevée par unité de poussée obtenue), ce qui réduirait le rendement global de l'avion.

326 *le vol sans escale le plus long jamais enregistré pour un oiseau…*
New Scientist 2492. « La barge rousse est la reine des airs. » 26 mars 2005.
11 septembre 2007 : une barge vole 11 500 km non-stop de l'Alaska à la Nouvelle-Zélande. [`2qbquv`]

327 *Optimisation des sauts de puce : la distance idéale est d'environ 5 000 km*. Source : Green (2006).

330 *Chiffres pour un catamaran transportant des passagers*. Source [`5h6xph`] : masse déplacée (à pleine charge) 26,3 tonnes. Pour un voyage de 1 050 milles marins, ce bateau a consommé exactement 4 780 litres de carburant. D'après mon calcul, cela représente un coût de transport de fret de 0,93 kWh par tonne-km. Soit dit en passant, je fais ce calcul à partir du poids total de l'embarcation. Le rendement de transport des *passager*s par ce même vaisseau est d'environ 35 kWh pour 100 p-km.

332 *L'ékranoplane Lun.* Sources : `www.fas.org` [`4p3yco`], (Taylor, 2002a).

Pour en savoir plus : Tennekes (1997), Shyy et al. (1999).