

1 Consommation

"Defence": 4	
Transporting stuff: 12 kWh/d	Geothermal: 1 kWh/d
Stuff: 48+ kWh/d	Tide: 11 kWh/d
Food, farming, fertilizer: 15 kWh/d	Wave: 4 kWh/d
Gadgets: 5	Deep offshore wind: 32 kWh/d
Light: 4 kWh/d	Shallow offshore wind: 16 kWh/d
Heating, cooling: 37 kWh/d	Biomass: 1 kWh/d
Jet flights: 30 kWh/d	Biomass: food, biofuel, wood, waste incin'n, landfill gas: 24 kWh/d
Car: 40 kWh/d	PV farm (200 m ² /p): 50 kWh/d
	PV, 10 m ² /p: 5
	Solar heating: 13 kWh/d
	Wind: 20 kWh/d

Partons du **bilan comparé** de la consommation (en rouge) et des limites de la production d'énergie renouvelable (en vert) (sewtha p. 101).

PV est l'acronyme de Photo-Voltaïque.

Les grands chapitres de la consommation en énergie en Angleterre sont :

- Les produits manufacturés (souvent à l'étranger).
- L'agriculture.
- Le chauffage des bâtiments (important en Angleterre).
- Les transports aériens.
- La voiture.

Pour équilibrer entre production et consommation, on peut soit augmenter la production (mais la colonne verte est une limite), soit diminuer la consommation.

Voyons quelles sont les possibilités d'agir sur 3 derniers facteurs de la consommation.

2 Chauffage

Même si le chauffage est un chapitre moins lourd en France qu'en Angleterre, il est concerné en France par une très grande partie des mesures pour limiter la consommation d'énergie.

Il s'agit donc de limiter les pertes thermiques ; nous parlerons aussi, par souci de cohérence disciplinaire (thermique), des possibilités les plus économiques de chauffage.

Bien entendu les pertes thermiques dépendent du climat, température extérieure et régime des vents, sans compter le caractère isolé du bâtiment et sa taille (rapport surface sur volume). Les échanges thermiques se font à la surface.

Voici quelques comparaisons entre bâtiments, presque tous à Cambridge (UK) - sewtha p.299 :

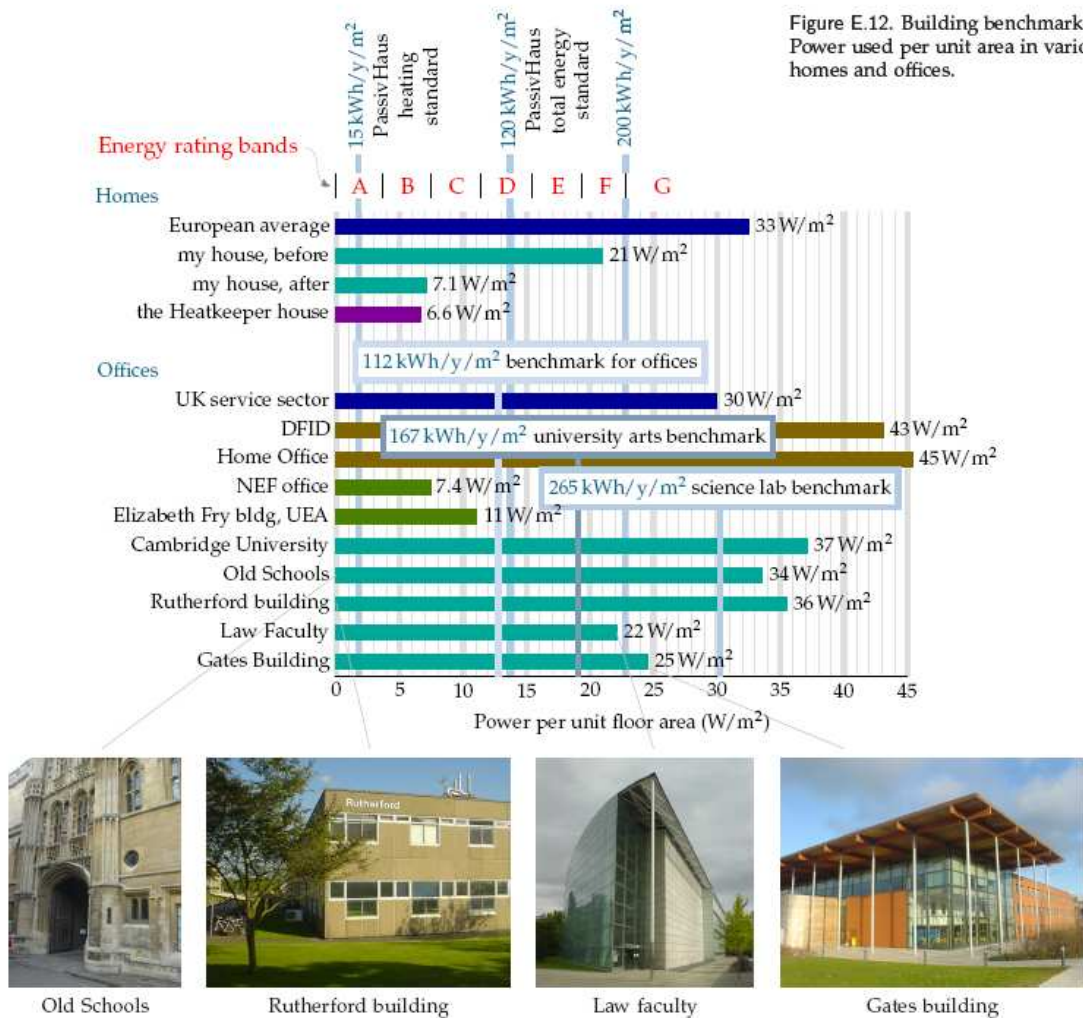


Figure E.12. Building benchmarks. Power used per unit area in various homes and offices.

La plupart des bâtiments publics ou privés consomment une trentaine de Watts par m^2 , à comparer au possibilités de les alimenter en énergies alternatives, photo-voltaïque (de 10 à 20 W/m^2) ou aux capteurs solaires d'eau chaude (50 W/m^2).

La comparaison entre la deuxième ligne (la maison de Mc Kay avant isolation thermique) et la troisième (après) est édifiante.

Mais tous ces efforts ne portent que sur 20 pour cent de la consommation totale en Angleterre et probablement moins en France (entre 10 et 15 pour cent). Il en est de même pour l'éclairage : nous sommes en mesure de remplacer les lampes à incandescence par des lampes basse consommation,

fluorescentes ou LED, gagnant ainsi des facteurs 3 ou plus, mais ce chapitre ne consomme que quelques pour cents du budget énergie total.

2.1 Pompes à chaleur

Pour diminuer la consommation d'énergie une voie intéressante est d'améliorer le rendement des chaudières. Une autre possibilité est la pompe à chaleur.

Une pompe à chaleur fonctionne comme un réfrigérateur. La source chaude, ici l'air ou le sol à l'extérieur, est refroidie par l'évaporation du fluide réfrigérant et l'air du bâtiment est réchauffé par la condensation du fluide par le compresseur. La pompe peut être inversée et utilisée pour l'air conditionné en été.

Rappelons que le principe de Carnot pour une machine thermique s'écrit :

$$\text{rendement} = \frac{W}{Q} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1)$$

Le rendement d'une machine thermique qui transforme de la chaleur en quantité Q en travail W est dépend des températures absolues de la source chaude T_2 et de la source froide T_1

Le même principe s'applique aux réfrigérateurs, à l'air conditionné et aux pompes de chaleurs pour transformer le travail du compresseur en chaleur transférée de la source froide à la source chaude, mais "à l'envers".

$$\text{facteurdeconversion} = \frac{Q}{W} = \frac{T_2}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

Les facteurs de conversion sont typiquement de 3 à 4 pour les machines actuelles. Ils dépendent bien sûr des différences de température souhaitées.

Une limite sur les flux : la chaleur ne peut pas être "pompée" trop vite sous peine de refroidir notablement la source chaude.

Une estimation de la quantité de chaleur récupérable est donnée par le flux reçu par le sol en été, en supposant que c'est ce flux qui sera utilisé en hiver pour réchauffer le bâtiment. Ce flux par mètre carré est donné par (sewtha pages 303 et 306) :

$$\Phi = \sqrt{\kappa C_v \omega} \quad (3)$$

où κ est la conductivité thermique du sol, C_v sa chaleur spécifique et $\omega = 1/2\pi an$ la fréquence angulaire du cycle annuel. Cette formule obtenue par intégration de l'équation de la chaleur donne pour un sol moyen un flux de 5 W/m².

Un chiffre du même ordre, $3W/m^2$, est obtenu en limitant le différentiel de température entre le circuit de refroidissement et le sol à 5 degrés.

Ces flux sont comparables avec ceux du photo-voltaïque et de l'éolien. Mais rappelons que la pompe est en plus consommatrice d'énergie.

3 Transports

Équation de base :

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Pour vaincre la résistance de l'air, la puissance nécessaire varie comme le cube de la vitesse v^3 . Pour obtenir une évaluation plus réaliste on remplace la section du véhicule par une section efficace, produit de la section réelle par un coefficient de drag qui ne dépend que la forme du véhicule.

3.1 Transports terrestres

Pour une voiture A , la section "efficace", est le produit de la section géométrique par un coefficient de drag de l'ordre de 0.3. D'autres termes vont intervenir dans l'équation de la puissance, frottements solides, freinage (circulation urbaine), mais ce premier terme suffit à donner un ordre de grandeur.

McKay introduit un terme de rendement de 0.25 pour les pertes par dissipation thermique (Carnot +) et donne une puissance nécessaire de 80kWh par 100km pour une vitesse de 110 km/h.

Ce résultat est comparable aux données empiriques. Une voiture consommant 8 litres aux 100 km nécessite une énergie de $8l * 10kWh/l = 80kWh$ par 100 km.

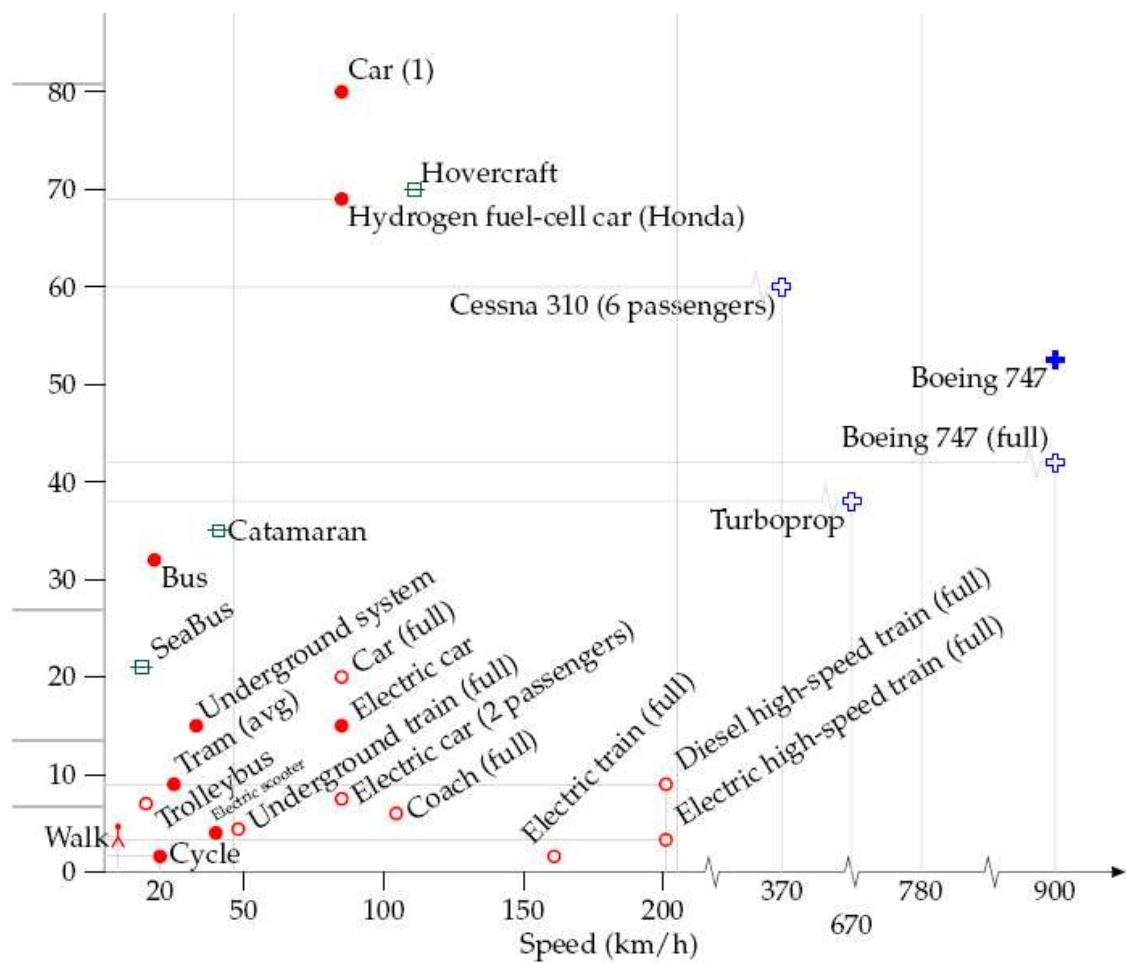


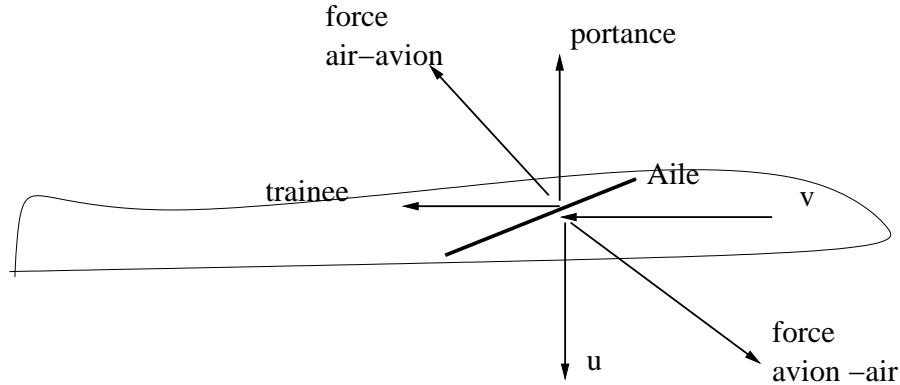
Tableau donnant la consommation en kWh par 100 km par personne de quelques moyens de transport, en fonction de la vitesse.

En terme d'économie d'énergie la formule 4 implique les mesures suivantes :

- Rouler moins vite : économies substantielles grâce au terme en v^3
- Récupérer les énergies de freinage, important en ville et sur les autoroutes peri-urbaines : véhicules hybrides.
- Mais surtout utiliser les transports en commun et car-pool.
- vélo etc.

3.2 Transports aériens

(sewtha p.269).



Le bilan des échanges mécaniques avec l'air se décompose en un terme de traînée, semblable à celui des véhicules terrestres et un terme de portance, permettant le maintien en vol de l'avion.

La portance est obtenue par un échange de quantité de mouvement entre l'avion et les molécules d'air défléchies vers le bas par l'aile. Calcul approximatif. Un cylindre de masse m_s acquiert une vitesse verticale u par unité de temps. L'impulsion horizontale acquise pendant le temps t est donc :

$$m_s u = \rho v t A_s u \quad (5)$$

l'équilibre portance/poids de l'avion est obtenu pour :

$$\rho v t A_s u = m g t \quad (6)$$

la vitesse acquise par la masse d'air varie en sens inverse celle de l'avion !

$$u = \frac{m g}{\rho v t A_s} \quad (7)$$

Et la puissance que doivent développer les moteurs est donc donnée par le transfert d'énergie cinétique par unité de temps :

$$P = \frac{1}{2t} m_s u^2 = \frac{(m g)^2}{2 \rho v A_s} \quad (8)$$

Contrairement aux véhicules terrestres, l'avion doit aller vite pour rester en l'air.

L'énergie totale par unité de longueur, due à la traînée + la portance, est la somme des deux termes :

$$P_{tot} = \frac{1}{2}\rho A_p v^2 + \frac{(mg)^2}{2\rho v^2 A_s} \quad (9)$$

(division par v pour passer de l'énergie par unité de temps à l'énergie par unité de longueur).

La vitesse optimum est obtenue en dérivant par rapport à v ; elle correspond à l'égalité des deux termes, portance et traînée. Le transport aérien nécessite a priori une dépense double du transport terrestre. De plus les avions volent à une vitesse optimale. Les seules économies d'énergie possibles aujourd'hui sont le coefficient de remplissage (et de limiter les vols long courrier).

En continuant les calculs (sewtha p.272 et 273), on s'aperçoit que le produit du carré de la vitesse optimum par la densité de l'air est une constante dépendant des caractéristiques de l'avion, d'où l'intérêt du vol à haute altitude. De même la poussée des réacteurs ne dépend pratiquement que du poids de l'avion.

4 Conclusions

Plus de la moitié de la consommation en énergie des occidentaux correspond aux dépenses de chauffage et de transport.

Les dépenses de chauffage (et d'éclairage) peuvent être réduites de manière significative par des technologies appropriées, isolation, utilisation directe de l'énergie solaire, et dispositifs particuliers comme les pompes à chaleur. Dans ce dernier cas, attention aux limites par unité de surface, quelques W/m^2 .

Dans le cas des transports terrestres, des économies certaines sont possibles essentiellement par les transports en commun et le vélo ; ces solutions ne font pas appel à de nouvelles technologies que de façon très marginale.

Pour les transports aériens, la technologie est au point. Seule possibilité : leur réduction.