

1 Consommation

“Defence”: 4	
Transporting stuff: 12 kWh/d	Geothermal: 1 kWh/d
Stuff: 48+ kWh/d	Tide: 11 kWh/d
	Wave: 4 kWh/d
	Deep offshore wind: 32 kWh/d
Food, farming, fertilizer: 15 kWh/d	Shallow offshore wind: 16 kWh/d
Gadgets: 5	Biodex: 1.5 kWh/d
Light: 4 kWh/d	Biomass: food, biofuel, wood, waste incin’n, landfill gas: 24 kWh/d
Heating, cooling: 37 kWh/d	
Jet flights: 30 kWh/d	PV farm (200 m ² /p): 50 kWh/d
	PV, 10 m ² /p: 5
	Solar heating: 13 kWh/d
Car: 40 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.

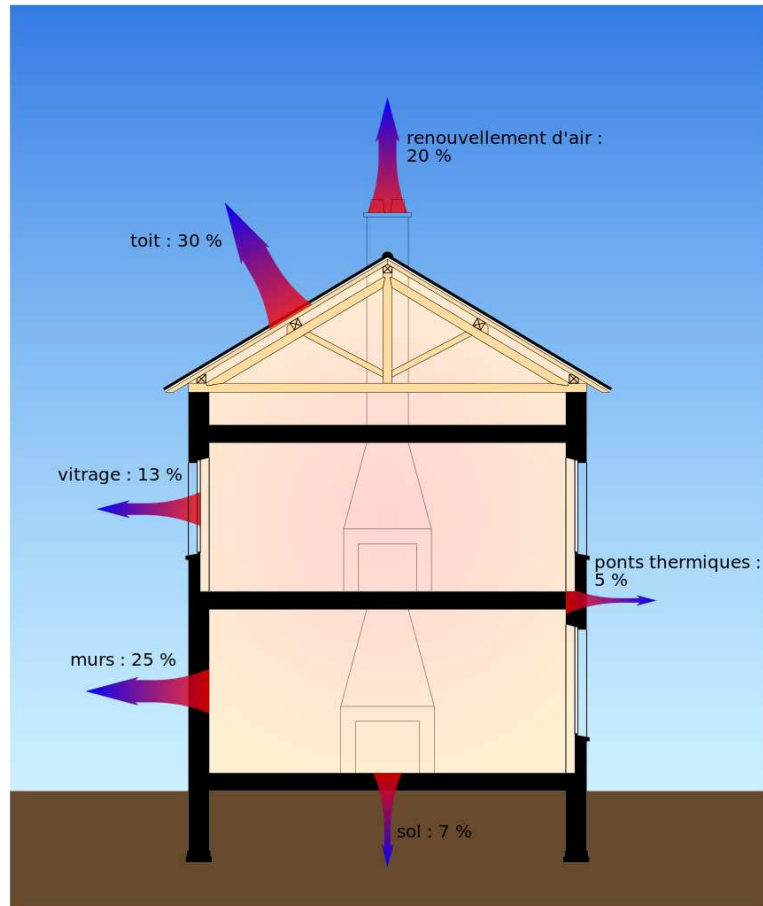
Les grands chapitres de la consommation en énergie en Angleterre sont :

- Les produits manufacturés (souvent à l'étranger).
- L'agriculture.
- Le chauffage des bâtiments.
- 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

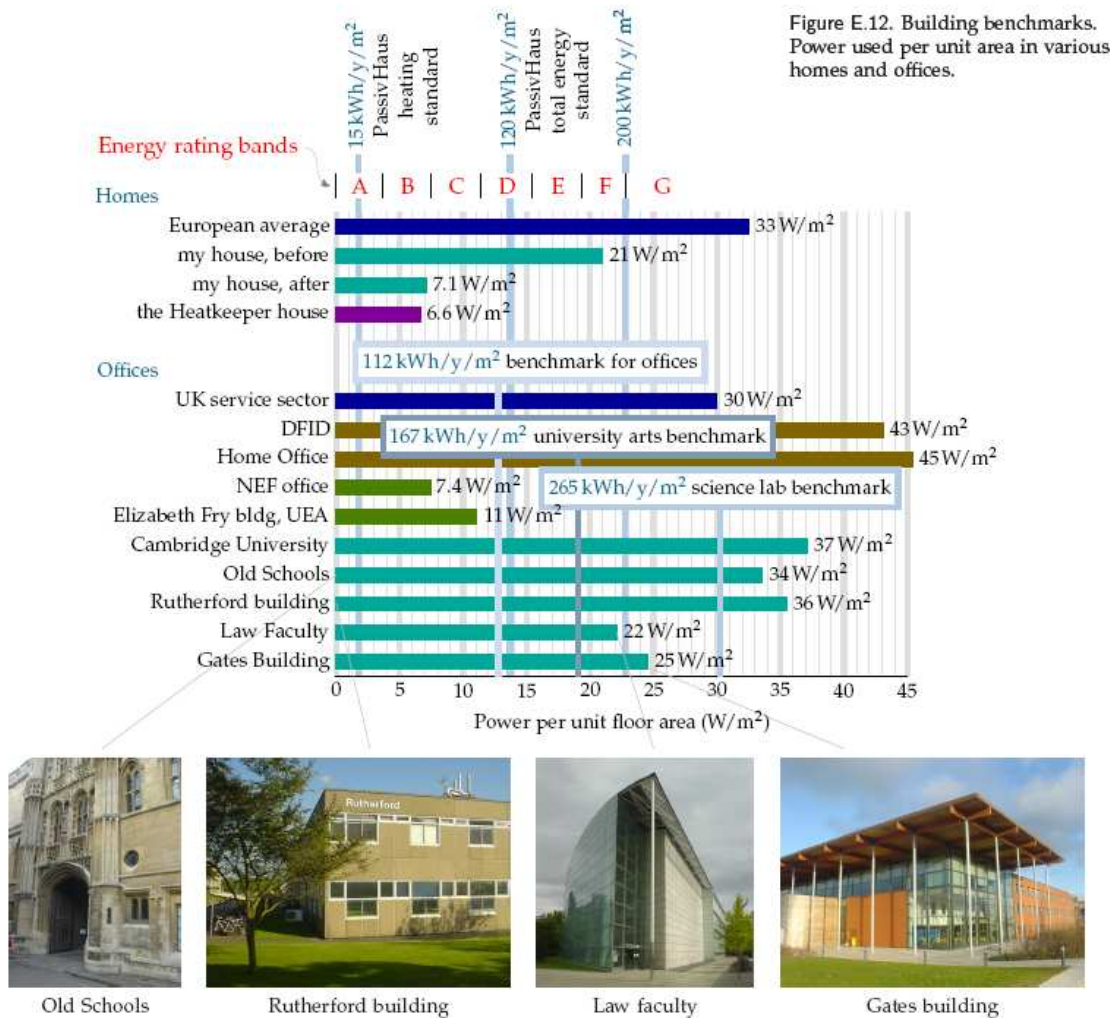


Voici un schéma de la répartition des pertes thermiques d'un bâtiment (mal isolé).

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.

Je tire du Mackay quelques comparaisons entre bâtiments existants, presque tous à Cambridge (UK) - sewtha p.299 :



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.

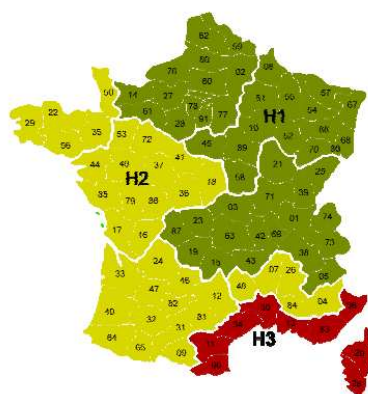
2.1 En France

Pas de données aussi localisées, mais une moyenne sur les bâtiments construits avant 1975 donne 44 W/m^2 .

Notre politique est définie par la Réglementation thermique « Grenelle Environnement 2012 ». Les objectifs sont d'arriver à une moyenne de $5,5 \text{ W/m}^2$ en moyenne. Les puissances du tableau sont données en Kwh/an. On passe aux watt en divisant par 9.

Les avancées de la RT 2012

➔ Une consommation globale d'énergie réduite d'un facteur 2 à 4



Zones climatiques	RT2005 (Cmax en logement)		RT2012
	Chauffage par combustibles fossiles	Chauffage électrique (dont pompes à chaleur)	
H1	130	250	60
H2	110	190	50
H3	80	130	40

* Cette valeur moyenne est modulée en fonction de la localisation géographique, de l'altitude, du type d'usage du bâtiment, de sa surface pour les logements, et des émissions de gaz à effet de serre des bâtiments



10

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.

2.2 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 calculé en résolvant l'équation de la chaleur (Fourier + sewth pages 303 et 306) :

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

où ΔT est l'amplitude de la variation de température entre été et hiver, κ est la conductivité thermique du sol, C_v sa chaleur spécifique et $\omega = 1y/2\pi$ 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 $5W/m^2$.

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 :

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

Où ρ est la densité de l'air, c_t est le coefficient de trainée, A l'aire de la section du véhicule et v sa vitesse. (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.)

Pour vaincre la résistance de l'air, la puissance nécessaire varie comme le cube de la vitesse v^3 .

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. (les 10kWh sont fournis par la combustion d'un litre d'octane)

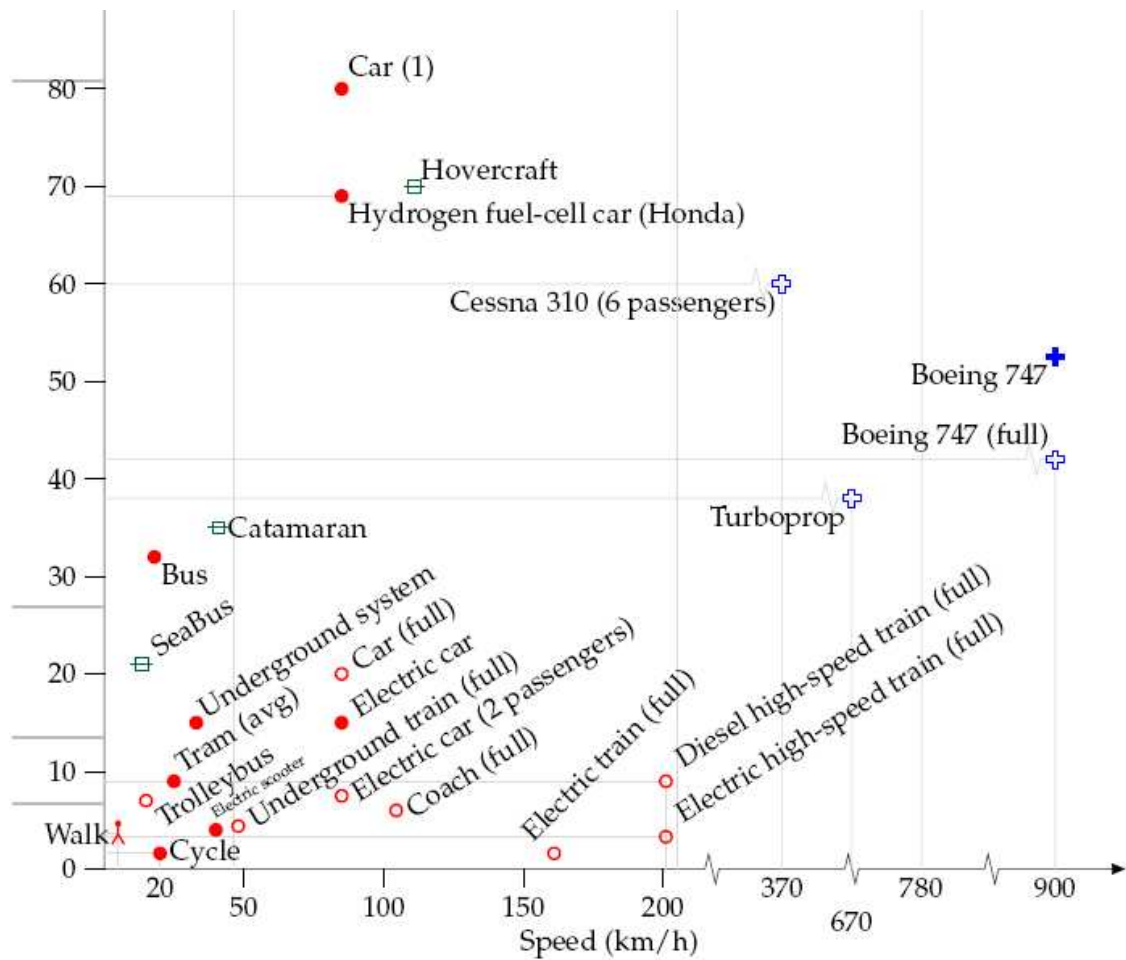


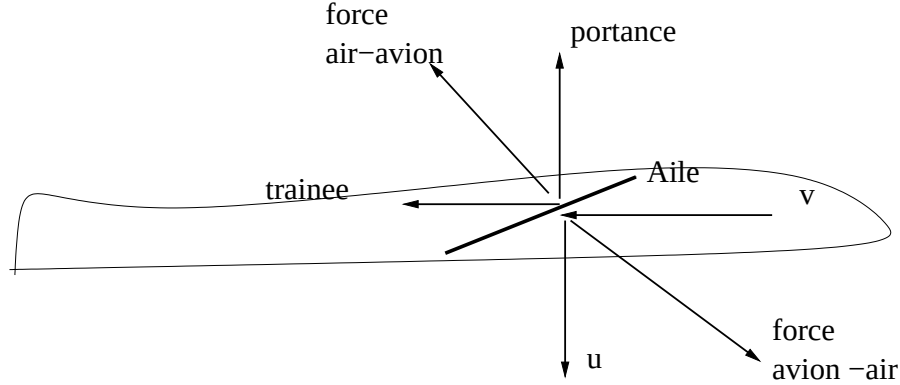
Tableau donnant la consommation en kWh par 100 km par personne de quelques moyens de transport, en fonction de la vitesse.

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 Transport aérien

(sewtha p.269).



Les performances de l'avions sont discutées par MacKay (sewtha p. 269 et seq.) à partir des raisonnement simples basés sur les échanges de quantité de mouvement entre les molécules d'air et l'avion. En voici les principaux résultats.

Les molécules d'air situées sur le trajet de l'avion sont défléchies par l'aile et lui communiquent une force dont les deux composantes sont la traînée, semblable à celle des véhicules terrestres, qui ralentit l'avion, et la portance, qui permet son maintien en vol.

La puissance dissipée pour la portance est donnée par le transfert d'énergie cinétique par unité de temps (sewtha p. 271) :

$$P = \frac{(mg)^2}{2\rho v A_s} \quad (5)$$

où m est la masse de l'avion, v sa vitesse, ρ la densité de l'air, et A_s est l'aire d'un tube d'air balayé par les ailes.

Le coût en énergie du transport est l'énergie dissipée par unité de longueur. Ce rendement inverse est le rapport de la puissance à la vitesse- c'est aussi la poussée F des moteurs ; il s'exprime par la somme d'un terme de traînée (eq. 4) et d'un terme de portance (eq. 5) :

$$F = \frac{1}{2}\rho c_t A_p v^2 + \frac{(mg)^2}{2\rho v^2 A_s} \quad (6)$$

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 nécessiterait donc a priori une dépense double du transport terrestre).

$$\rho v^2 = \frac{mg}{c_t A_p A_s} \quad (7)$$

En reportant le résultat sur la vitesse (eq. 7) dans l'expression de la poussée (eq. 6) on obtient :

$$F = \sqrt{\frac{c_t A_p}{A_s}} mg \quad (8)$$

Autrement dit, la poussée, et donc le rendement de l'avion, sont proportionnels à son poids multipliée par un coefficient géométrique constant. Le rendement inverse est de 0,4 kWh/tonne/km.

En somme, les avions volent à une vitesse optimale, et leur rendement énergétique en tonne*km est constant. Les seules économies d'énergie possibles aujourd'hui sont le coefficient de remplissage (et de limiter les vols long courrier).

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.