

# Les limites technologiques des énergies renouvelables

Gérard Weisbuch  
CERES, Ecole Normale Supérieure, Paris

**ENS**  
Ecole Normale Supérieure

**CERES-ERTI** Centre d'Enseignement et de Recherches sur l'Environnement et la Société  
Environmental Research and Teaching Institute

Accueil | Enseignement | Recherche | Projets | Publications | Téléchargements | Séminaires | Liens | Annuaire | Contact | English version

**Environnement & Société**

Systèmes dynamiques  
Climat  
Géographie  
Economie  
Anthropologie  
Géologie  
Ecologie  
Systèmes complexes

**Dynamical systems**

- Michael Ghil
- Barbara Coluzzi
- Mickael Chekroun
- Jean Roux

**Geography**

- Claude Kergomard

**Ecology & Evolution**

- David Claessen
- Mickael Chekroun
- Régis Ferrière

**Philosophy of ecology**

- Julien Delord

**Anthropology**

- Elise Demeulenaere

**Economics**

- Patrice Dumas
- Stéphane Hallegatte

**Climate**

- Michael Ghil
- Denis Rousseau

**Geology**

- Marie-Dominique Løye

**Complex systems**

- Gérard Weisbuch

Search this site

Agenda CERES

## Environnement et ignorance

Le choix des politiques publiques dépendent des informations disponibles et des buts poursuivis sur le moyen et le long terme.

Bien que les buts affichés sur le long terme soient convergents, les débats restent confus à cause des incertitudes scientifiques mais aussi de l'ignorance du public, des medias et des décideurs à propos des :

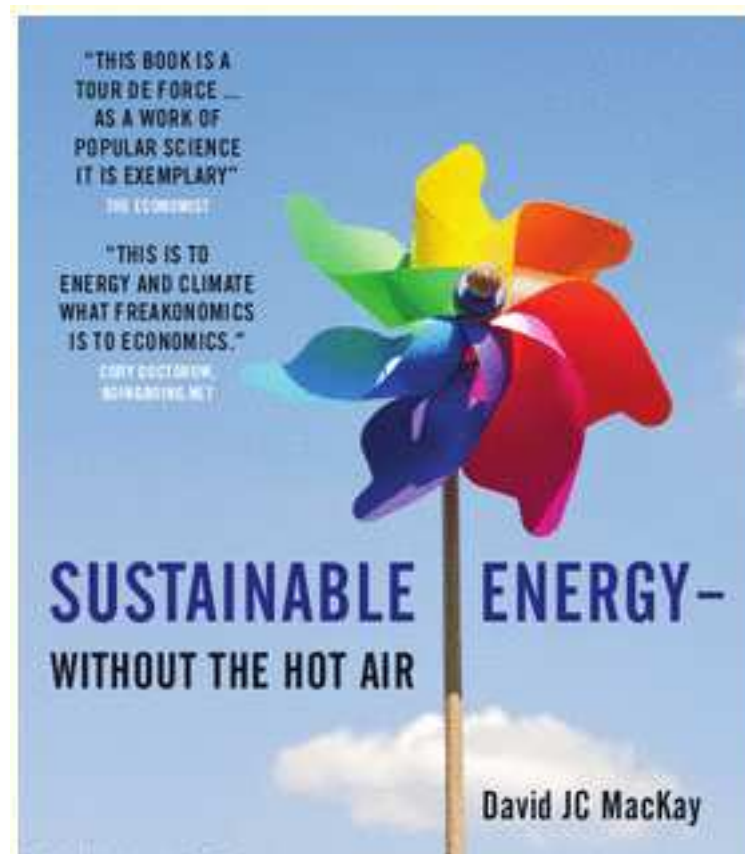
- Facteurs physiques et biologiques qui ont un rôle de contraintes.
- Facteurs économiques (coûts)
- Choix éthiques (équité "geopolitique", inter-générationnelles etc.)

Ne pas confondre les incertitudes scientifiques, par exemple sur les conséquences d'un doublement de la teneur en  $CO_2$ , avec par exemple, l'ignorance des limites en rendement de l'énergie solaire.

Objectif pédagogique de cette séance : démontrer que vos propres connaissances vous permettent de vous forger directement votre opinion sans recourir à des arguments d'autorité.

## Sustainable Energy without the hot air

David JC MacKay 2009, <http://www.withouthotair.com/>



Les limites physiques des énergies renouvelables eût égard à la demande.

## Les unités

Il faut recourir non seulement au calcul et à la physique, mais le rideau qui masque l'information est largement dû aux unités et à leur diversité.

Baril de pétrole, Tep, Megawatt, tonne de  $CO_2$ ...

L'unité MKSA d'énergie est le Joule, mais petit et pas pratique.

On utilise le kWheure =  $3600 \times 1000 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}$ . Il coûte aujourd'hui quelques centimes.

L'unité MKSA de puissance est le watt mais la consommation domestique fluctuant au cours de la journée, c'est le kWheure/jour que nous utiliserons :  $1 \text{ kWheure/jour} = 40 \text{ W}$

La consommation moyenne en Europe par personne est de :  
125 kWheure/jour

A titre de référence :

1 baril de pétrole = 160 litres equiv. à 1.7 MWheure.

1 Tonne equ. pétrole = 12,5 MWheure.

## La consommation quotidienne par habitant en UK

Il s'agit bien sûr de moyennes, pour un riche britannique.

- Transports : 70 kwh/j/p dont avion 30 , voiture 40.
- Chauffage et refroidissement : 37 kWh/j/p
- Eclairage 4
- Gadgets électroniques 5
- Nourriture (agriculture) 15
- Constructions, grands équipements ... 60
- Défense 4

Le total est de 195 kwh/j/p qui se ramène en moyenne à 125 kwh/j/p avec sensiblement les mêmes pourcentages. USA, 250 kWh/j/p.

Deux pistes vers la viabilité :

- Réduire ce bilan. Un objectif High Tech : 80 kWh/j/p.
- Passer des énergies fossiles aux énergies renouvelables.

On parlera aujourd'hui du solaire, et un peu de l'éolien.

## Energie solaire

Flux en haut de l'atmosphère :  $1400 \text{ W/m}^2$ .

En moyenne, sur la journée (et la nuit) au sol (latitude !) :  $100 \text{ W/m}^2$ . (UK).

Energie maximum récupérable :  $2.4 \text{ kWh/j/m}^2$ .

## Chauffe eau solaire : effet de serre

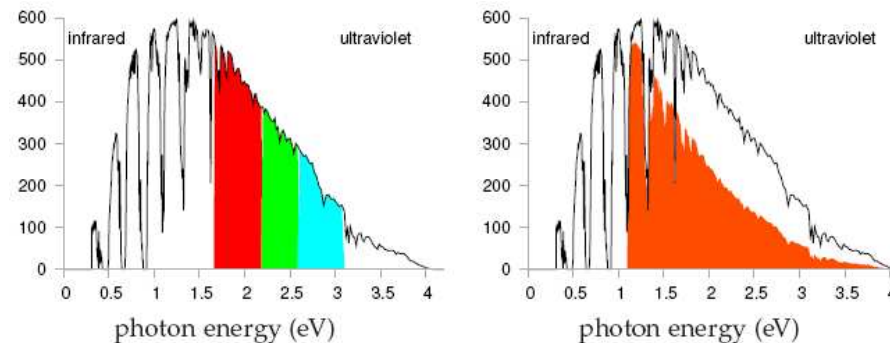
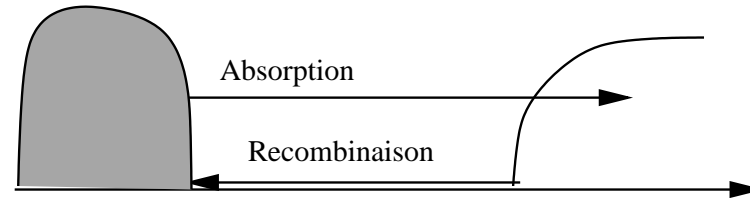
Les pertes par conduction et par le rayonnement ré-émis limitent le rendement maximum à 50 %. Par conséquent le rendement du solaire thermique est de  $50 \text{ W/m}^2$ .

En utilisant  $10\text{m}^2$  de panneaux orientés au sud on récupère donc 13 kWh/j. Cette énergie est une énergie thermique : elle peut servir à l'alimentation en eau chaude et au chauffage, mais elle n'est pas transformable en électricité sans pertes importantes.

# Energie solaire et cellules Photo-Voltaïques

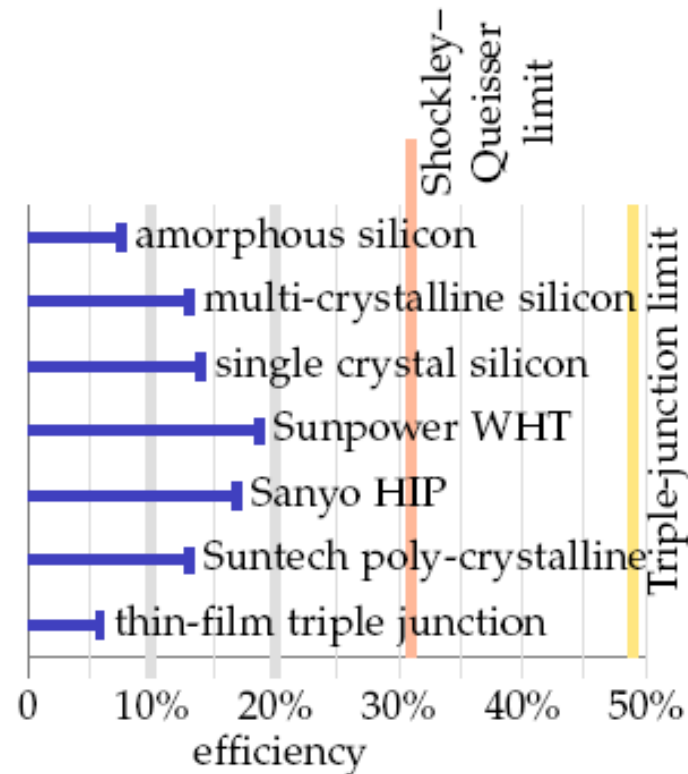
Transformation de la lumière solaire en énergie électrique

Rendements : limite théorique de Shockley-Queisser : 31%. Le photon absorbé excite un électron de la bande de valence (pleine) vers la bande de conduction (vide). Mais les photons d'énergie inférieure au gap (1,2 eV) ne servent à rien et l'énergie des électrons excités au-delà du gap est en partie perdue lorsque les collisions les ramènent vers le bas de la bande de conduction.



A gauche spectre des photons incidents, à droite, en orange spectre des énergies disponibles.

## Rendements des cellules Photo-Voltaïques réelles



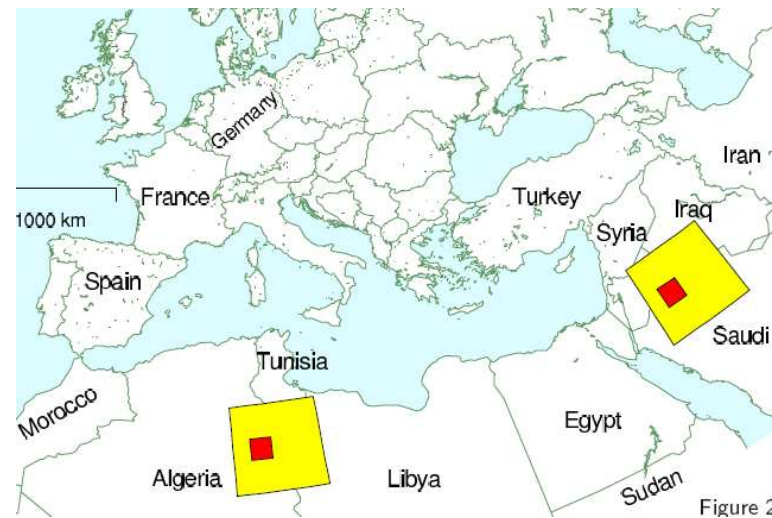
Un panneau solaire à bon marché a un rendement de  $10 \text{ W}/\text{m}^2$  (en GB, 12 à Paris, 14 à Toulouse).



## Intégrons

Les Anglais consomment 125 kWh par personne par jour. En couvrant 5% de leur territoire de cellules solaires de rendement 10% il pourraient générer  $10\% \times 100\text{W}/\text{m}^2 \times 200\text{m}^2 \times 24\text{ h} = 50\text{ kWh}/\text{jour}/\text{pers.}$  c'est à dire 40% de leurs besoins.

Et si ils importaient l'énergie solaire du Sahara ? Le projet Desertec.



Un carré jaune (600\*600 km) fournirait 125 kWh par personne et par jour à un milliard d'individus.  
Un carré rouge (145x145 km) fournirait tout le Royaume Uni.

Mais pertes en ligne très élevées. Avec la technologie actuelle, pertes aériennes + le problèmes des pertes dans l'eau salée avec le courant alternatif. Technologies futures :

- Lignes supra-conductrices à haute température.
- Transmission par courant continu (projet Desertec, High-voltage direct current (HVDC) transmission)

Mais aucune de ces technologies n'est au point aujourd'hui, et il n'est pas sûr qu'elles le soient bientôt (déjà 30 ans de recherches sur les supra-conducteurs à haute température!)

## Bio-carburants

L'énergie solaire est transformée en hydrates de carbone. Les produits peuvent être transformés en éthanol ou bio-diesels pour le transport ou brûlés dans une centrale thermique. Dans les meilleures conditions (abondance d'eau et d'éléments inorganiques) les rendements énergétiques sont :

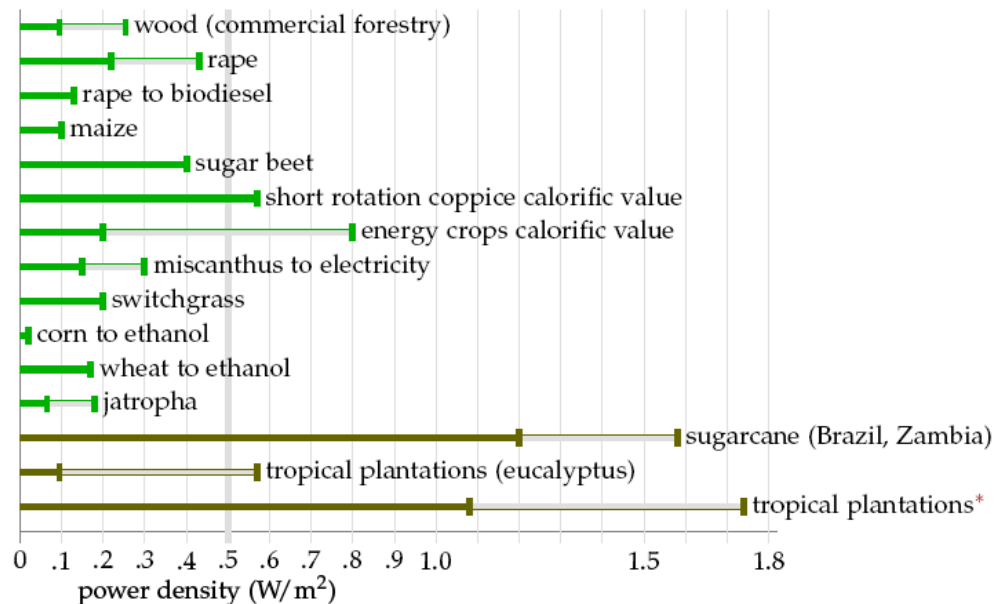
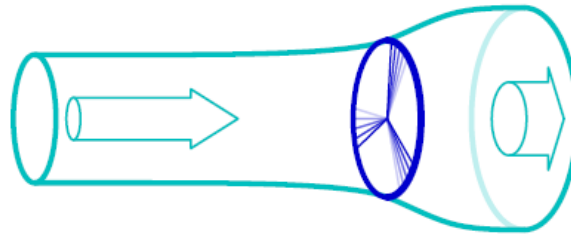


Figure 6.11. Power production, per unit area, achieved by various plants. For sources, see the end-notes. These power densities vary depending on irrigation and fertilization; ranges are indicated for some crops, for example wood has a range from 0.095–0.254 W/m<sup>2</sup>. The bottom three power densities are for crops grown in tropical locations. The last power density (tropical plantations\*) assumes genetic modification, fertilizer application, and irrigation. In the text, I use 0.5W/m<sup>2</sup> as a summary figure for the best energy crops in NW Europe.

autrement dit en Europe de l'ordre de  $0.5W/m^2$ , c'est à dire bien inférieurs au Photo-Voltaïque.

## Eolien



L'énergie cinétique incidente par unité de temps (la puissance) est le flux de l'énergie contenue dans le tube de section  $1 \text{ m}^2$  et de longueur  $v$ , la vitesse.

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

Où  $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$  est la masse volumique de l'air.

$$P = 140 \text{ W/m}^2 \quad (2)$$

Pour  $v = 6 \text{ m/s}$ ; un vent de force 4, classique en Bretagne.

Mais 50% de cette énergie doit être restituée (l'éolienne n'arrête pas le vent). Ce facteur de 50% se retrouve simplement en ne gardant que la composante axiale de l'énergie échangée entre le vent et la voile d'un bateau avec une voile à 45 degrés du vent.

Mais dans une ferme éolienne, les éoliennes sont typiquement écartées de 5 fois leur diamètre pour éviter les interférences. Les deux facteurs combinés, rendement de 50% et espacement des éoliennes 3%, réduisent le rendement à  $2.2W/m^2$ .

## Conclusions

Dans les exemples traités aujourd'hui, deux grandeurs sont importantes : les besoins et la densité de puissance récupérée au  $m^2$ . Les besoins individuels pourraient être couverts localement en zone rurale par l'énergie solaire et/ou l'éolien, mais certainement pas en ville.

Plus généralement, les choix politiques sont contraints dès le départ par les limites imposées par la physique.

Le débat citoyen devrait tenir compte de ces contraintes, mais il ne faut pas trop compter sur les médias traditionnels.

Par contre, la majorité d'entre vous est capable de suivre les arguments scientifiques. Il ne tient donc qu'à vous de ne pas vous laisser influencer par les arguments d'autorité.

Comprendre ces limites physiques est une excellente illustration des applications de la physique. Etudier "Sustainable Energy without the hot air" c'est apprendre de la bonne physique et de la bonne technologie.