

# ***Limites objectives des différentes énergies pour un développement durable***

***Prof. ém. Paul VANDENPLAS***



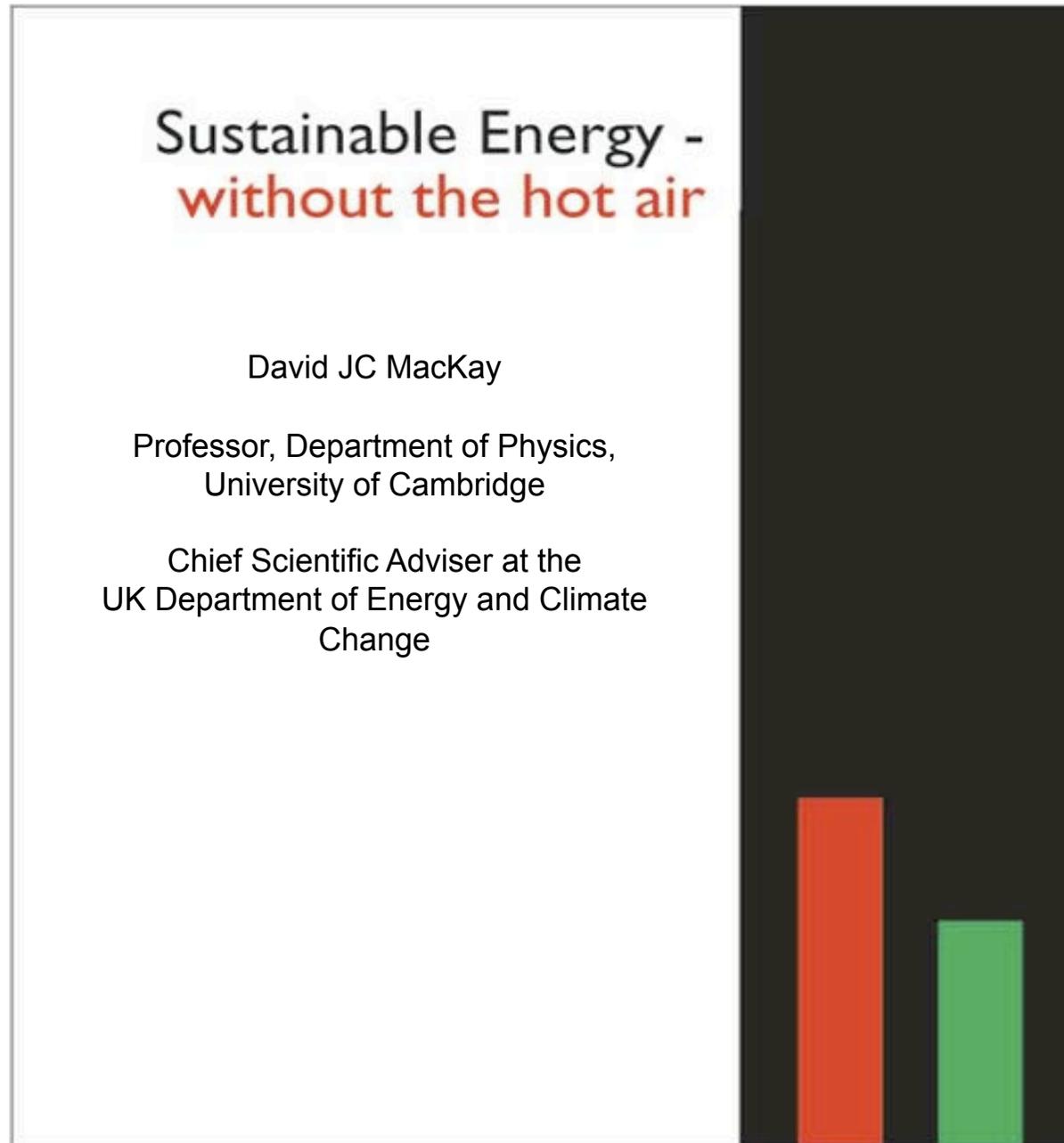
***Laboratoire de Physique des Plasmas – Laboratorium voor Plasmafysica  
Ecole Royale Militaire – Koninklijke Militaire School  
Académie Royale de Belgique,  
Collège Belgique,  
Bruxelles, 23 Mars 2011***

# Introduction

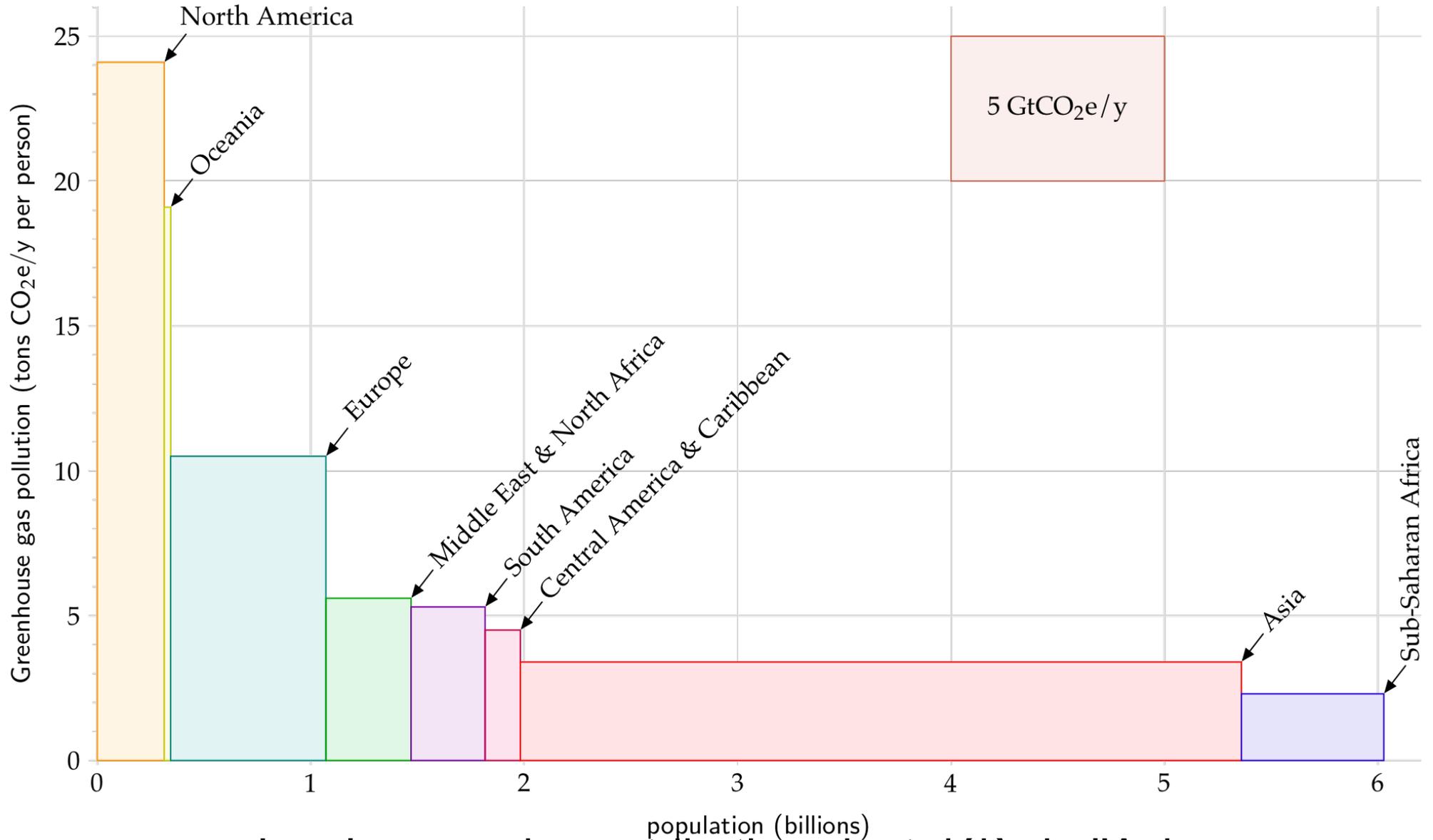
---

- Rappel de quelques caractéristiques de l'emploi de l'énergie et de l'émission des gaz à effet de serre
- Importance de chiffrer correctement les ordres de grandeur
- Les différents postes de consommation énergétique
- Les différentes énergies renouvelables
- Consommation actuelle en énergie en UK et en Europe
- Limites physiques et sociétales des énergies renouvelables à l'horizon 2050
- Plans verts (réalistes?) pour UK, Europe, Amérique du Nord et Monde
- Conclusions

# Source récente, fiable et critique des données énergétiques (2009)

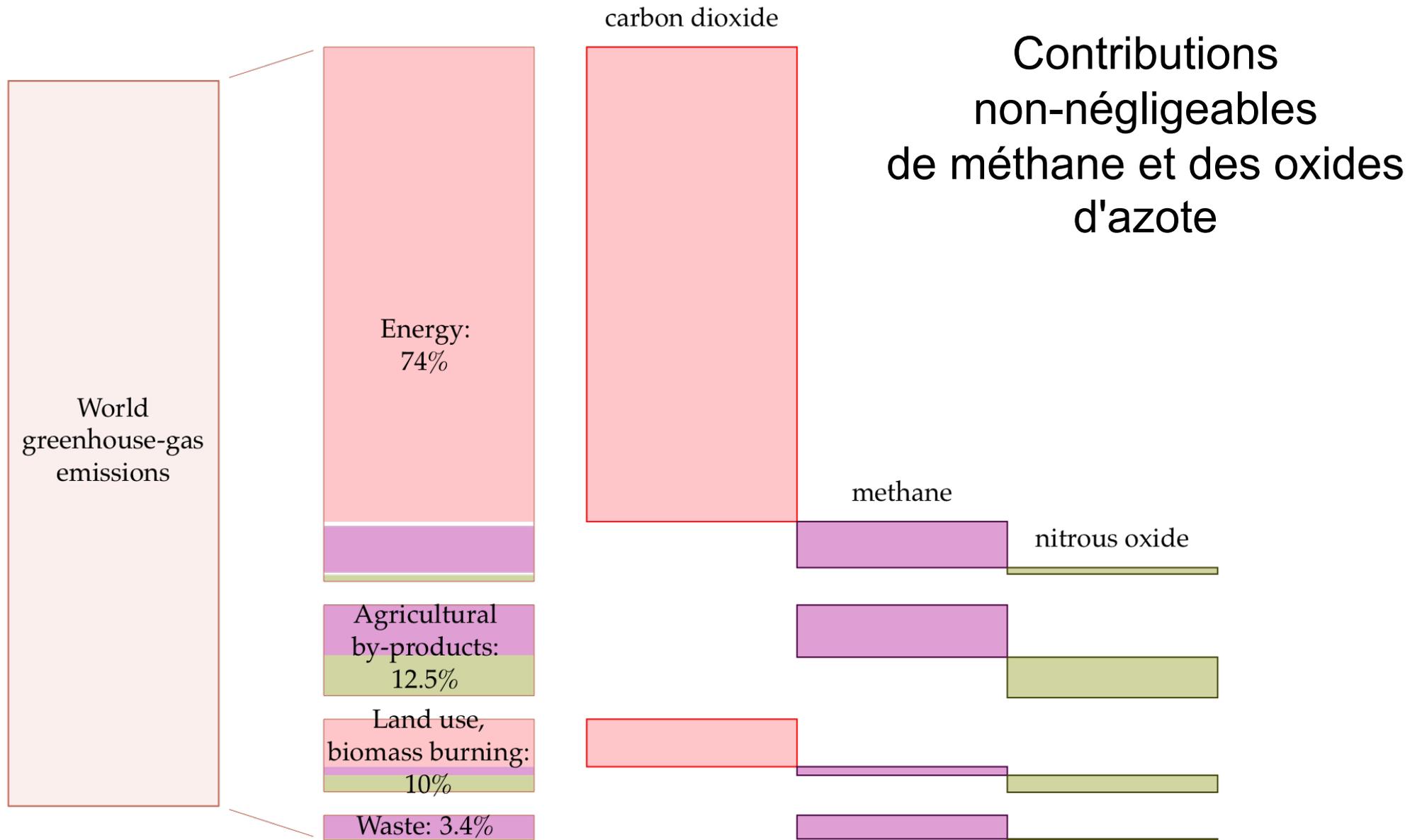


# Emissions de gaz à effet de serre en CO<sub>2</sub> équivalent par région (2000)



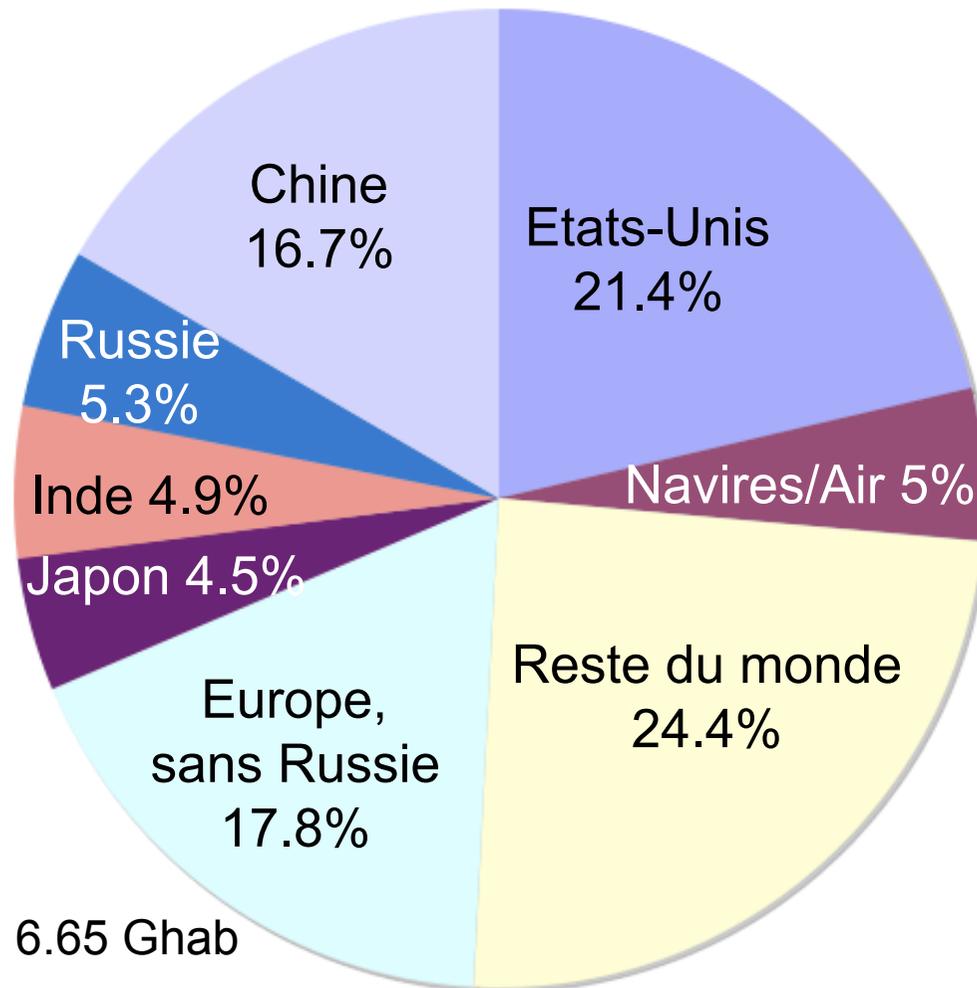
La plus grande contribution vient déjà de l'Asie  
Quoi si les Asiatiques consomment comme les Américains ?

# Emissions de gaz à effet de serre par secteur (2000)



# Emissions de CO<sub>2</sub> par pays (2004)

**2007 : Chine ~ Etats-Unis**



Monde: 6.65 Ghab

EU-25-USA-Japon-Russie: 1.15 Ghab

Chine: 1.31 Ghab

## Coût en CO<sub>2</sub>

**1kWh énergie chimique**  
**250g CO<sub>2</sub> (pétrole, essence)**  
**200g CO<sub>2</sub> (gaz)**

**1kWh(e) énergie électrique**  
**445g CO<sub>2</sub> (gaz)**  
**900g CO<sub>2</sub> (charbon)**

# Sources d'énergie primaire dans le monde

Source d'énergie	Puissance [TW]	Fraction [%]
Pétrole	4.6	36.6
Charbon	3.12	24.9
Gaz	3.02	24.1
Hydro-électricité	0.88	7.0
Nucléaire	0.81	6.5
Renouvelables	0.11	0.9

} **Fossile**  
**~ 85%**

# Énergie et Puissance

---

$$\text{Puissance} = \frac{\text{Énergie}}{\text{Intervalle de temps}}$$

$$W = \frac{E}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad E = W \Delta t$$

# Énergie : Unités utilisées

---

Pas de millions, milliards ou trillions

Rendre les quantités **comprehensibles** et **comparables**

Calculer par personne, à un chiffre significatif

Unité pratique d'énergie: **kWh** = 3.6 millions de Joule

Unité de puissance: **kWh par jour**

Flux d'énergie: **W par mètre carré (W/m<sup>2</sup>)**

Densité d'occupation du sol: **nombre de m<sup>2</sup> par personne**

UK: 4000m<sup>2</sup>

Belgique: 3000m<sup>2</sup>

# Consommation d'énergie en 2008

---

<b>Pays</b>	<b>Consommation [kWh/jour-personne]</b>
UK	125
Europe moyenne	130
Belgique	175
USA	250
Canada	270
Chine	25
Inde	17

# Énergie : Exemples de grandeurs pratiques

---

20 min de fonctionnement de bouilloire – 1kWh

alimentation – 3kWh/jour

bain – 5kWh

litre d'essence – 10kWh

cannette d'aluminium (15g) – 0.6kWh



# Voitures et Trains



Utilisation voiture, moyenne UK  
80 kWh par 100 personne-km



1 kWh par 100 personne-km (3 personnes)



6 kWh par 100 personne-km (électrique) en moyenne  
3 kWh par 100 personne-km (électrique) si plein

# Aviation

---

Un voyage aller-retour Londres-Le Cap par an



Équivalent à

**30kWh/jour-personne**

**Pas d'augmentation future radicale du rendement !**

**'Silent Aircraft' :  $\eta$   $\uparrow$  16%**

# Avions et voitures

---

---

energy per distance  
(kWh per 100 p-km)

---

Ryanair's planes, year 2007	37
Bombardier Q400, full	38
747, full	42
747, 80% full	53
Ryanair's planes, year 2000	73
Car (1 occupant)	80
Car (4 occupants)	20

# Voitures. Caractéristiques et améliorations possibles

## 1. Voiture à carburant fossile.

1. 75% de déperdition sous forme de chaleur

2. Pertes de l'énergie emmagasinée par freinage par unité de temps

$$\frac{\frac{1}{2} m v^3}{d}$$

d: distance entre 2 arrêts

3. Energie perdue par unité de temps dans l'air du sillage

$$\frac{1}{2} \rho A v^3$$

$\rho$ : densité de l'air

A: section efficace de voiture

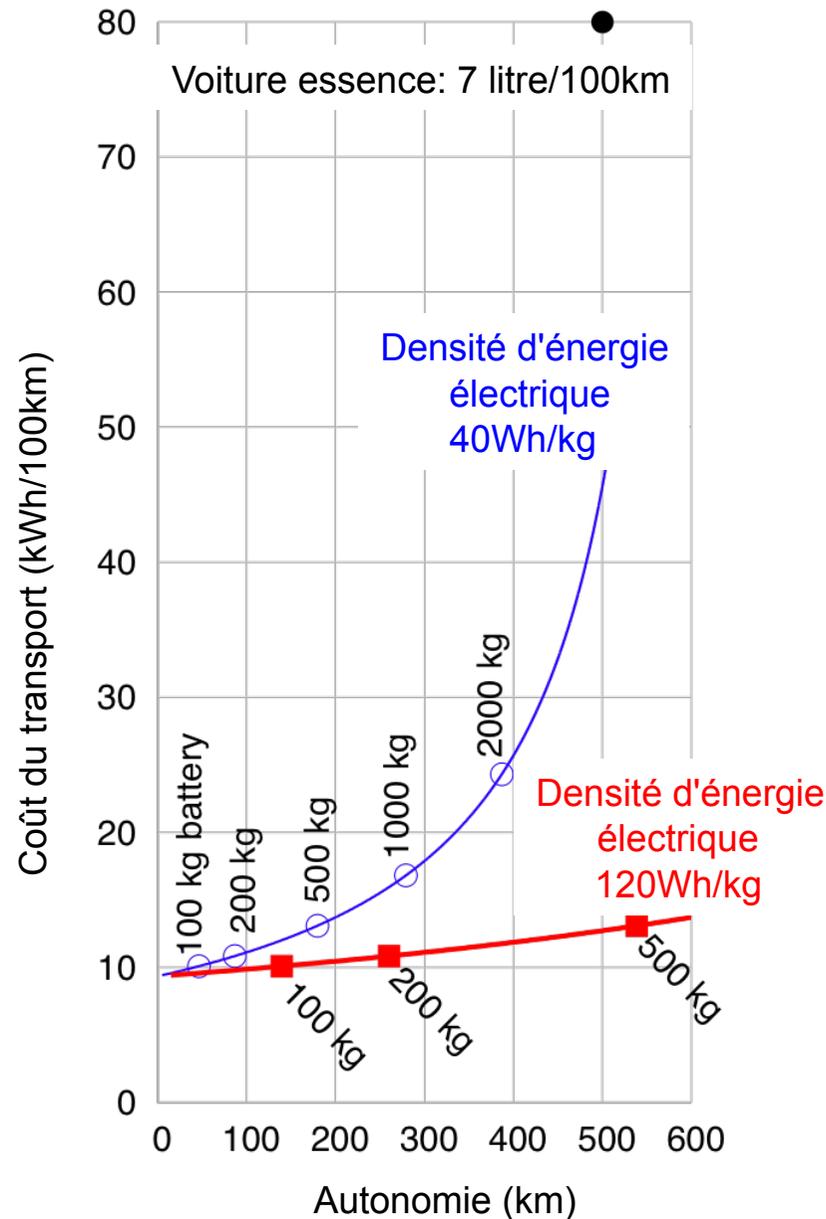
Pertes d'énergie 2 et 3 en  $v^3$ . Donc si  $v \rightarrow v/2 \implies$  consommation  $\rightarrow$  cons/8

4. Energie de roulement (friction avec route et dans parties mobiles)

Environ constante 10-12 kWh/100km

# Voitures. Caractéristiques et améliorations possibles

## 2. Avantages des véhicules électriques



# Mauvaise idée

---

## Transport 'Propre' Hydrogène avec énergies fossiles

### Clean Urban Transport for Europe

hydrogen made from fossil fuels:

overall primary energy consumption by the hydrogen buses was between 80% and 200% **greater** than that of the baseline diesel bus.

GHG emissions were between 40% and 140% greater.

**Conclusion : Attendre sources d'énergie non-fossiles abondantes avant l'emploi d'hydrogène pour le transport**

# Consommation domestique



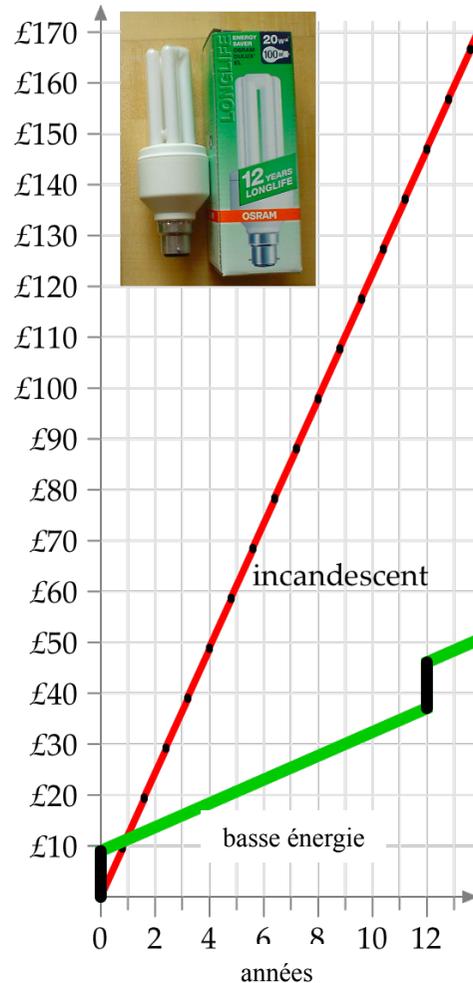
Chauffage et refroidissement maison, cuisine,  
lieu de travail: **37 kWh/jour-personne**

Soit : Chauffer eau: 12 kWh/jour-pers  
Chauffer air: 24 kWh/jour-pers  
Refroidissement: 1 kWh/jour-pers

# Éclairage

Consommation: ~ 4kWh/jour-personne  
Comprend l'éclairage domestique et au travail

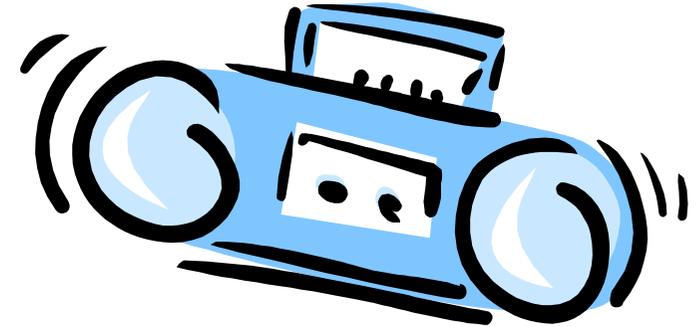
Coût comparé (actuel)



Rendement lumineux

Bulb type	efficiency (lumens/W)
incandescent	10
halogen	16–24
white LED	35 (futur :150)
compact fluorescent	55
large fluorescent	94
sodium street-light	150

# Appareils électriques divers



Gadget	Power consumption (W)			
	on and active	on but inactive	standby	off
Computer and peripherals:				
computer box	80	55		2
cathode-ray display	110		3	0
LCD display	34		2	1
projector	150		5	
laser printer	500	17		
wireless & cable-modem	9			
Laptop computer	16	9		0.5
Portable CD player	2			
Bedside clock-radio	1.1	1		
Bedside clock-radio	1.9	1.4		
Digital radio	9.1		3	
Radio cassette-player	3	1.2		1.2
Stereo amplifier	6			6
Stereo amplifier II	13			0
Home cinema sound	7	7	4	
DVD player	7	6		
DVD player II	12	10	5	
TV	100		10	
Video recorder	13		1	
Digital TV set top box	6		5	
Clock on microwave oven	2			
Xbox	160		2.4	
Sony Playstation 3	190		2	
Nintendo Wii	18		2	
Answering machine		2		
Answering machine II		3		
Cordless telephone		1.7		
Mobile phone charger	5	0.5		
				(i.e. 0.01kWh/jour)
Vacuum cleaner	1600			

**Total : 5kWh/jour-personne**

# Alimentation et agriculture

---

Nourriture: de matière première à produit brut

Fromage, lait: 1.5 kWh/jour

Oeufs: 1.0 kWh/jour

Légumes: 1.5 kWh/jour

Viande (227g/jour): 8.0 kWh/jour

---

**Total: 12.0 kWh/jour**

**Total moyen UK, y compris coûts énergétiques du travail agricole, engrais, transformation, réfrigération: 15.0 kWh/jour**

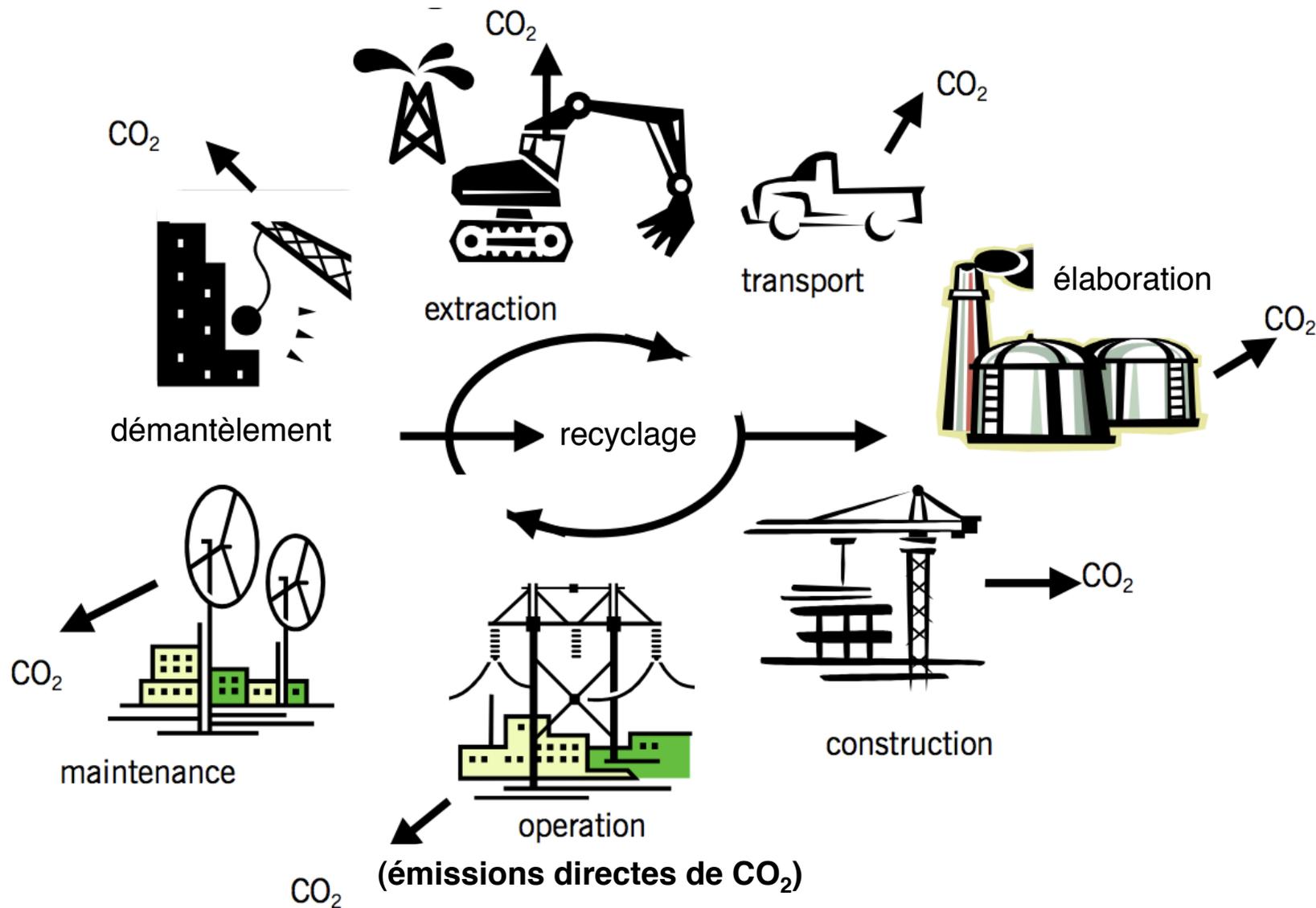
# Production et transport de matière et produits (kWh/jour-personne)

---

Récipients	3
Autres emballages	4
Ordinateurs	2.5
Batteries	0.1
Journaux, magazines et publicité	2
Maison (100 ans)	1
<hr/>	
Transport par route (1kWh/km-tonne)	7
Transport par eau (part UK dans le monde)	7
Cycle de l'eau (160 litre/jour)	0.4
Vente de détail	0.5
<b>Matière et produits importés</b>	<b>40</b>
<hr/>	
Total estimé	~ 60

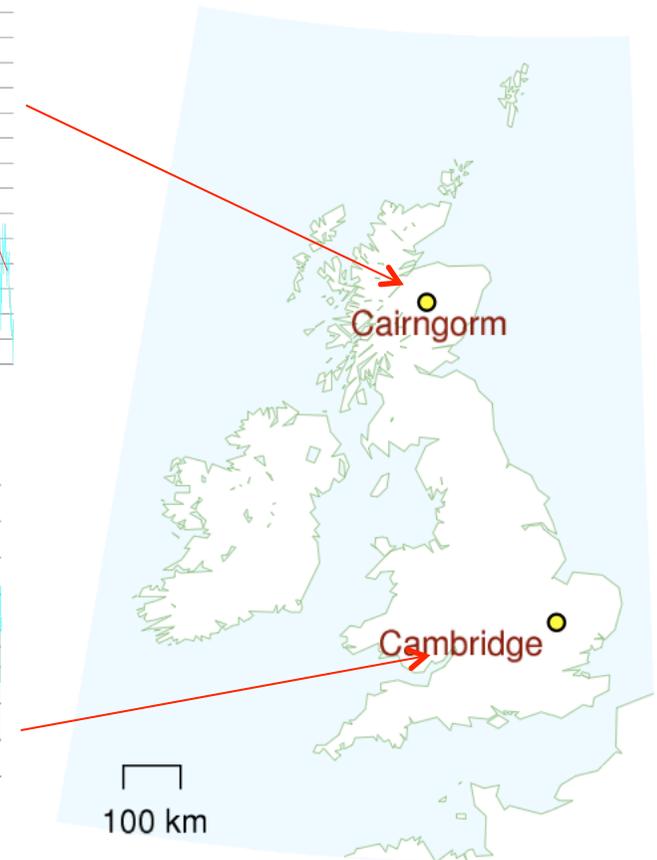
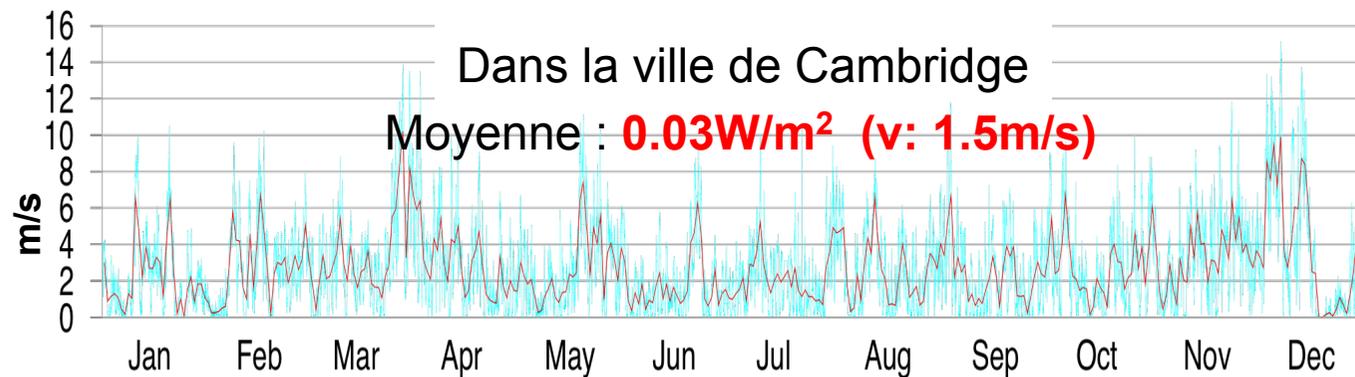
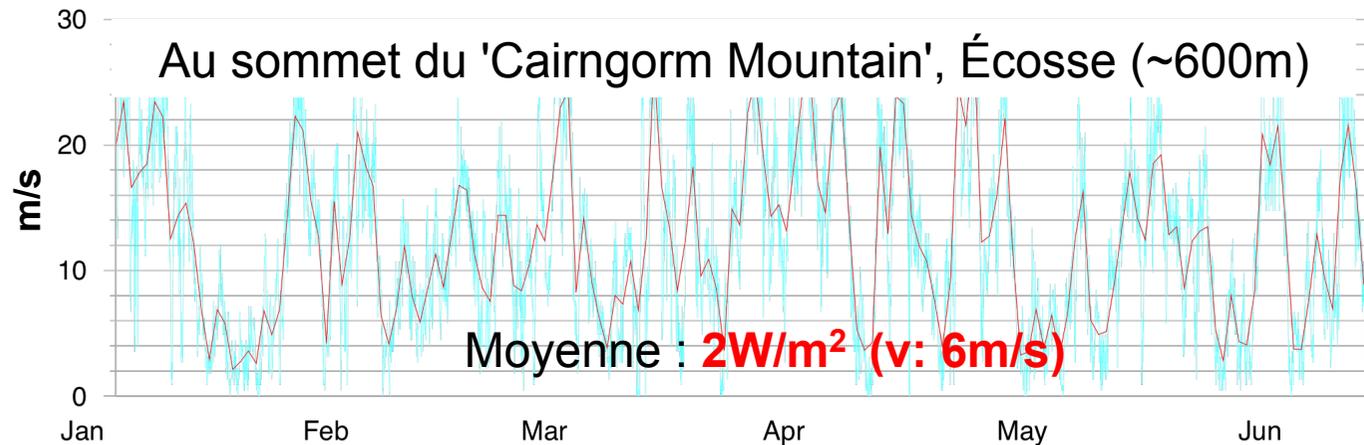
# Cycle de vie d'une technologie donnée ou d'un matériau

## Empreintes en CO<sub>2</sub> équivalent



# Production d'électricité : Éolien terrestre

Illustration des grandes fluctuations dans le vent dépendant du lieu  
Amplifiées dans la puissance par le facteur  $v^3$



**Moyenne UK:  $2W/m^2$**

**Problème: stockage et puissance de substitution souple !**

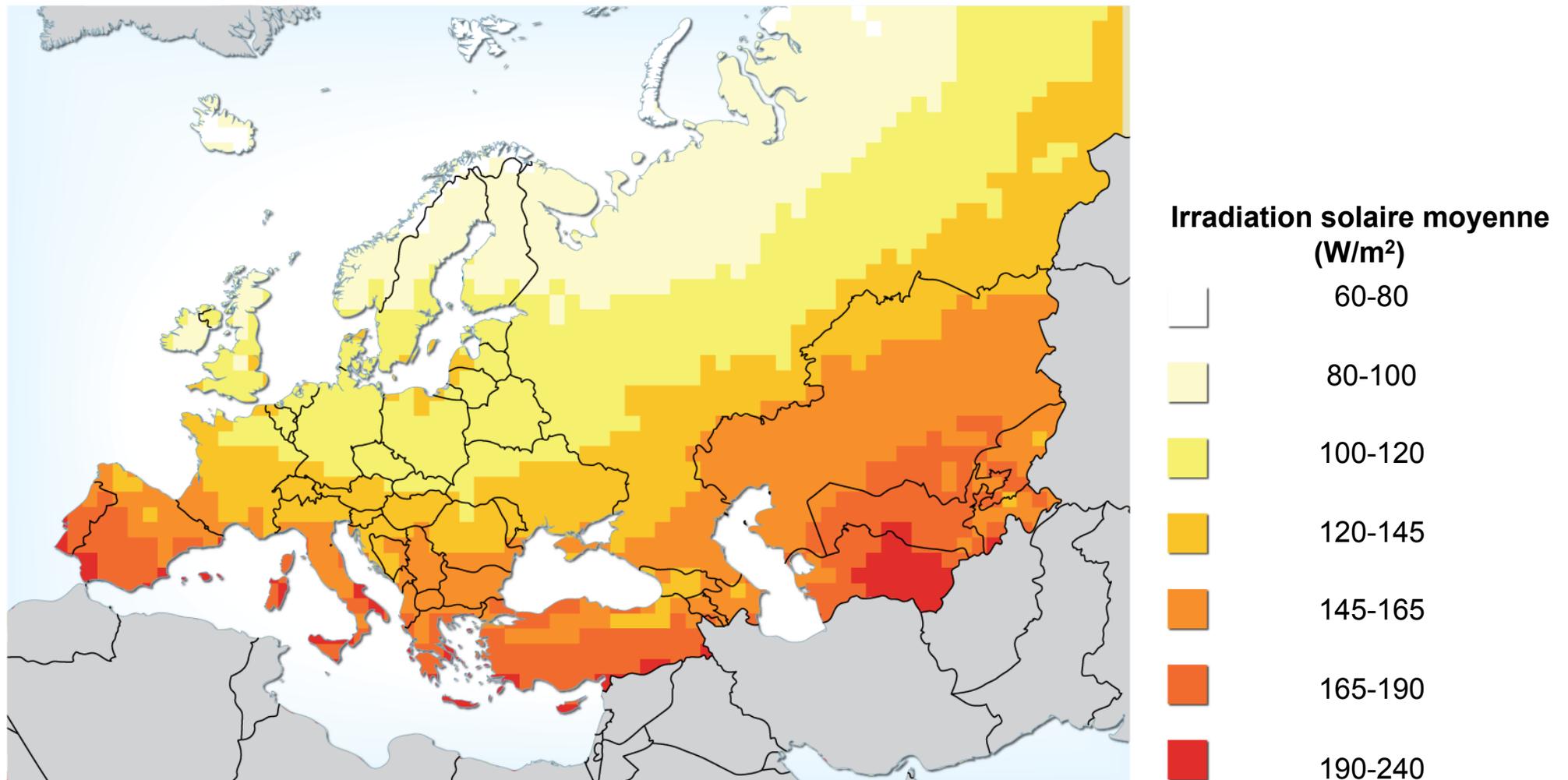
# Production d'électricité : Éoliennes marines

---



Surfaces très grandes  
Distances grandes entre éoliennes

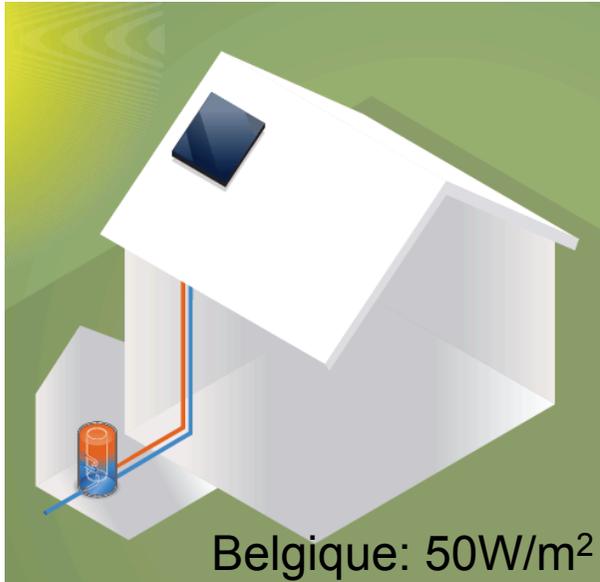
# Production d'électricité: Énergie Solaire



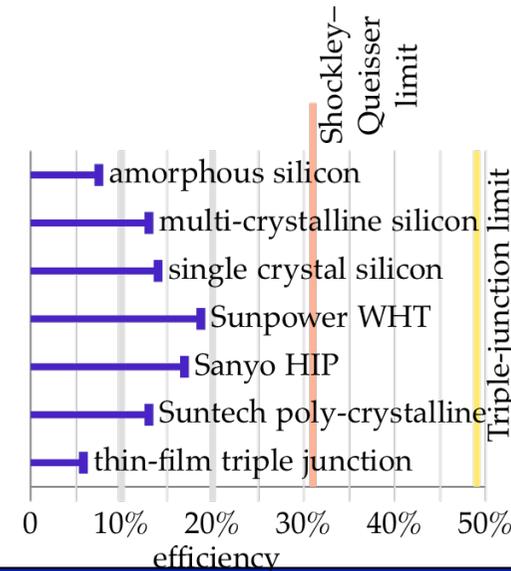
Irradiation solaire moyenne dans le Sahara : ~260 W/m<sup>2</sup>

# Énergie Solaire

## Solaire thermique



## Photovoltaïque

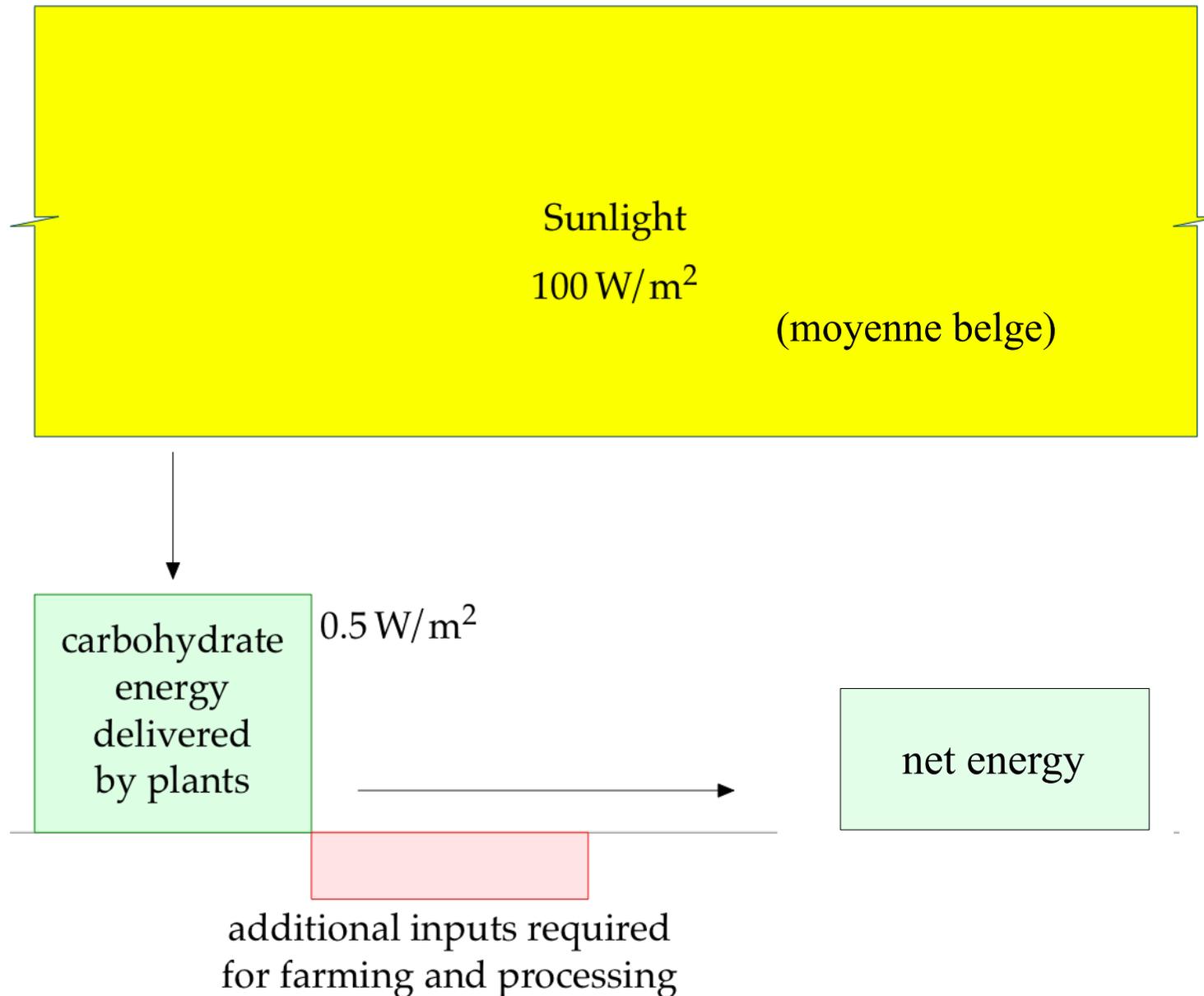


## Solaire concentré



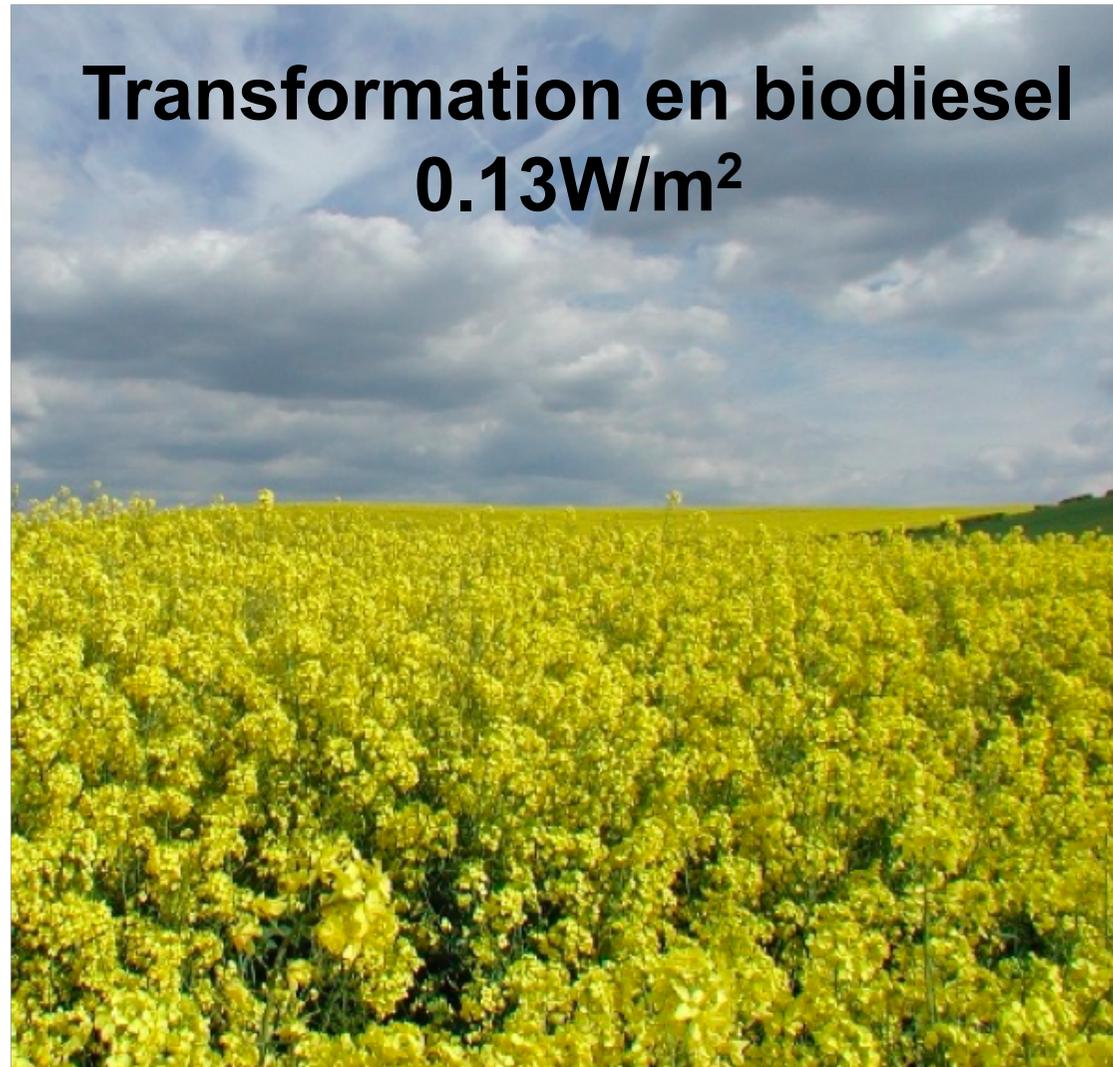
# Production d'énergie : Biomasse

L'énergie investie réduit fortement le rendement



# Biodiesel

---



Surfaces très grandes  
Rendement très petit par unité de surface

# Mauvaise idée ?

---

## Transport 'Propre' Biocarburants

It is a crime against humanity to convert food crops to fuel

Jean Ziegler,  
UN Special Rapporteur on the Right to Food.

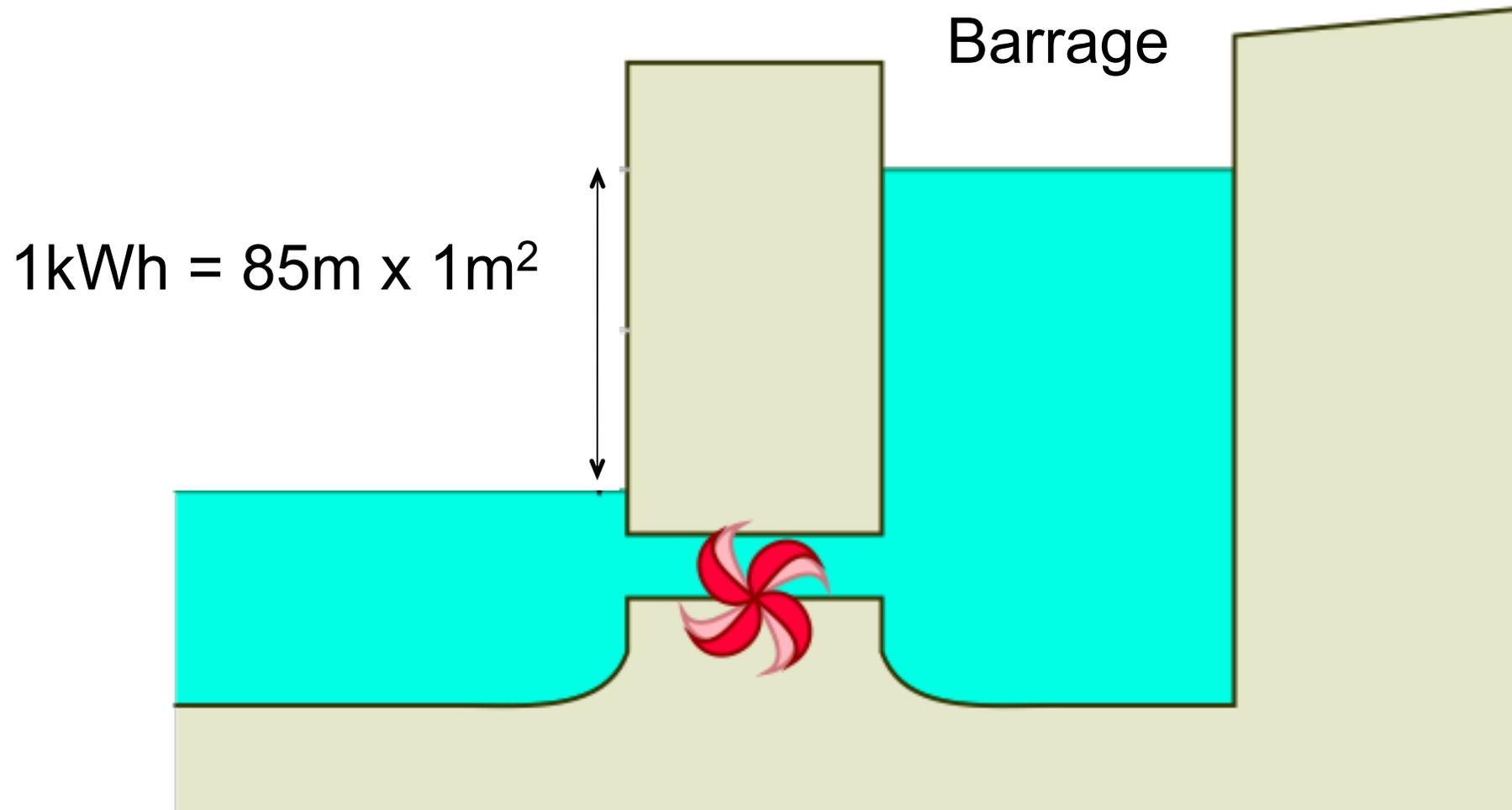
The world should wake up to the dangers of the mass production of biofuels

Professor Sir Peter Crane,  
Director, Royal Botanic Gardens, Kew.

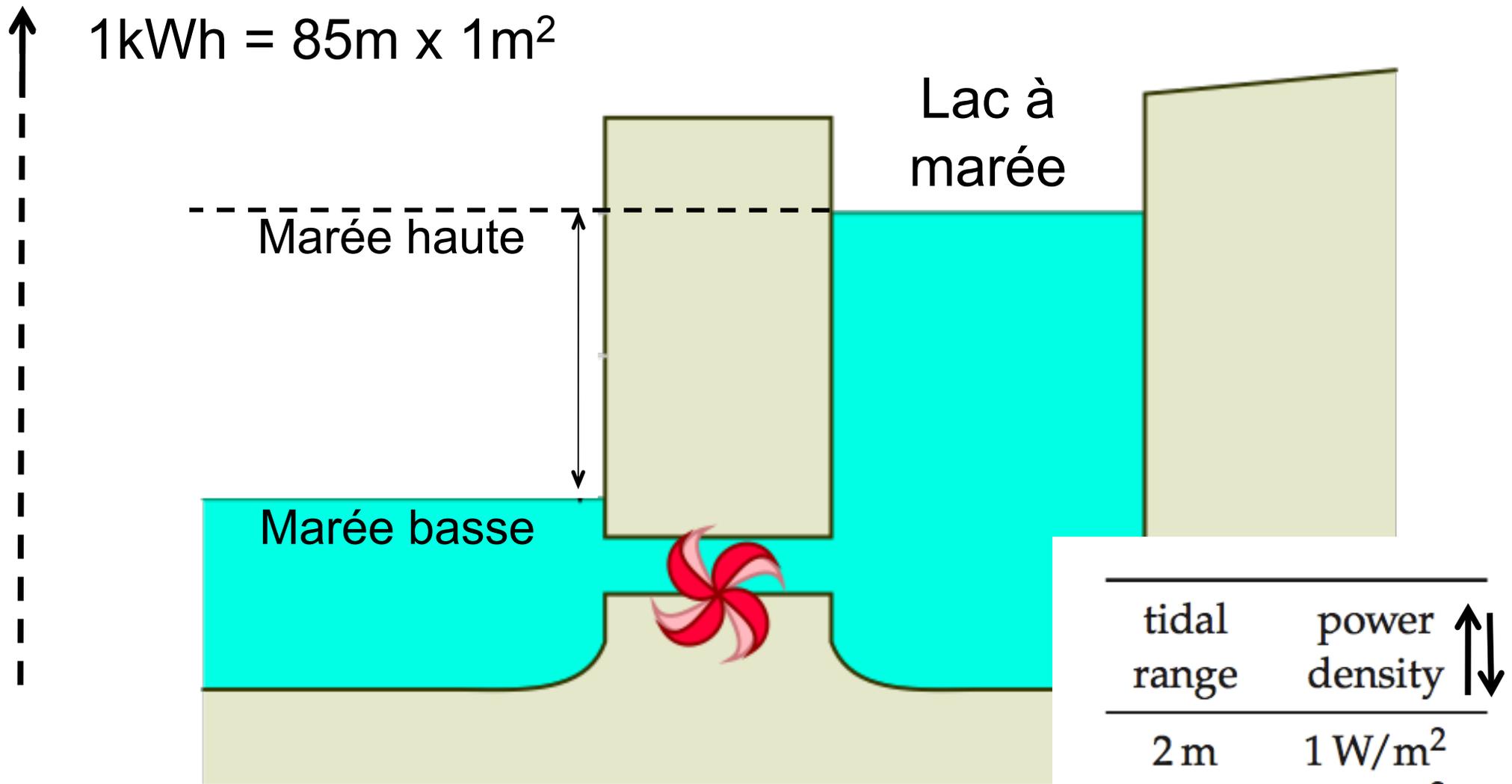
Substantial overall loss in CO<sub>2</sub> and energy,  
unless full production cycle is green

# Hydroélectricité

L'énergie renouvelable est très diluée



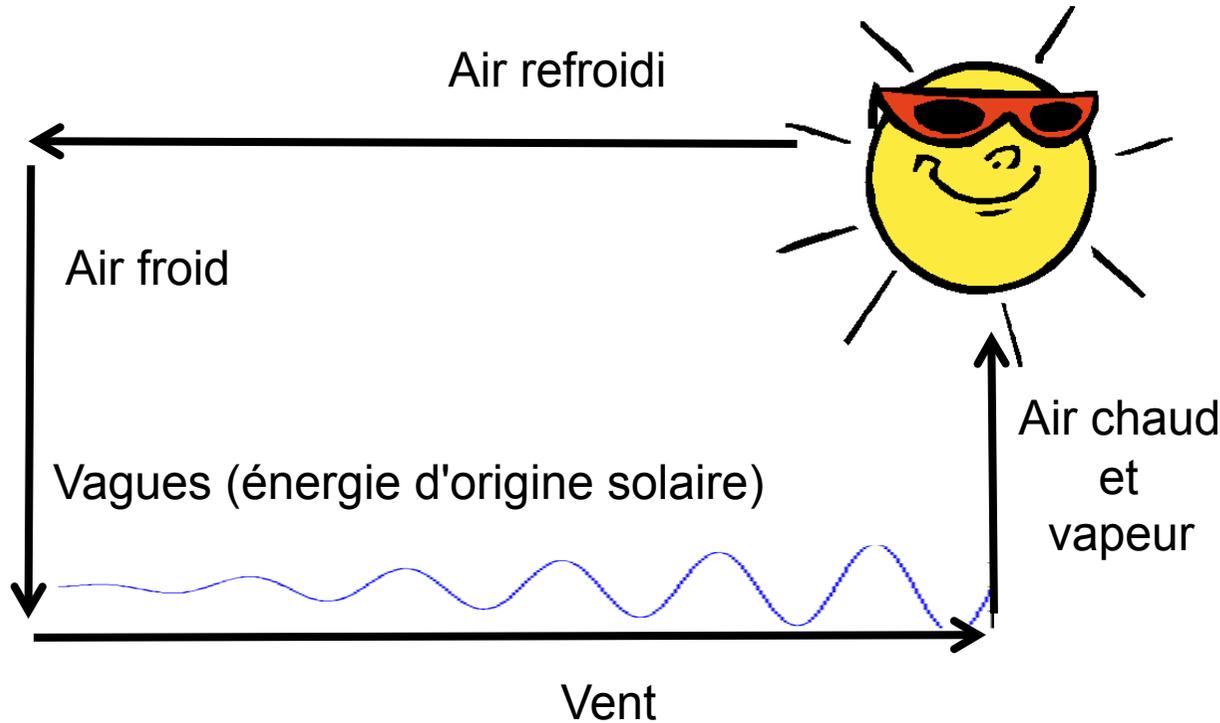
# Énergie de marées ou de courant de marée



**UK: 0.2kWh/jour-pers actuellement**

**Maximum maximumorum : 1.5kWh/jour-pers**

# Énergie houlomotrice



$\eta$  de énergie vagues  $\rightarrow$  électricité : basse

Exemple : prototype en 2002,  $\eta$  pratique  $\sim 5\%$  (prédit  $\sim 50\%$ )  
utilisant 350 000 kg d'acier pour puissance moyenne de seulement  
300 kW, correspondant à 150m de ferme

**500km de fermes modernes houlomotrices produiraient 1.2 kWh/j-p**

# Géothermie

## Contribution minimale de la géothermie

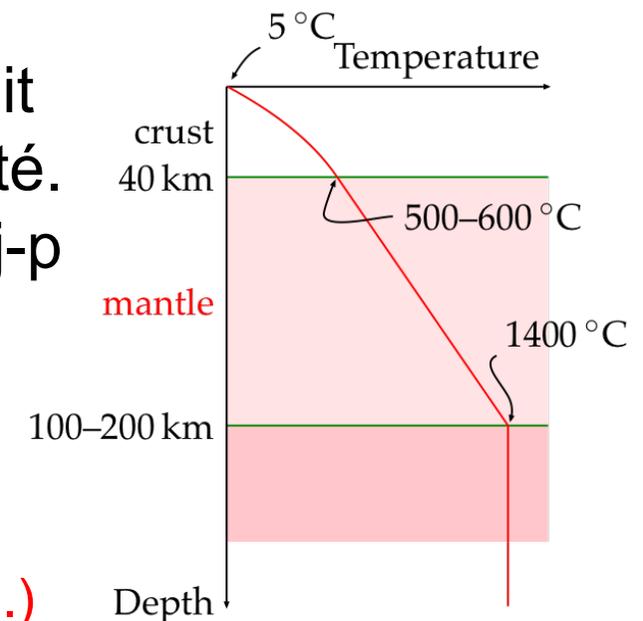
Chaleur du centre de la terre :  $\sim 0.01 \text{W/m}^2$   
Chaleur de la radioactivité dans le manteau :  $\sim 0.04 \text{W/m}^2$   
**Total:**  $\sim 0.05 \text{W/m}^2$

Moteur idéal à 15km de profondeur produit  $0.017 \text{W/m}^2$   
ou **2kWh/personne** pour la superficie du Royaume Uni

Remarque : ajouter coût de forer trous à 15km de profondeur

Exemple : Southampton (220 000 habitants) produit 70GWh/an pour eau chaude et surplus en électricité.  
-----15% de ce total par géothermie soit 0.13kWh/j-p  
ou seulement une puissance modeste de 1.2MW

**Conclusion:** Uniquement efficace où l'énergie thermique de profondeur accède naturellement à la surface (Islande, etc...)

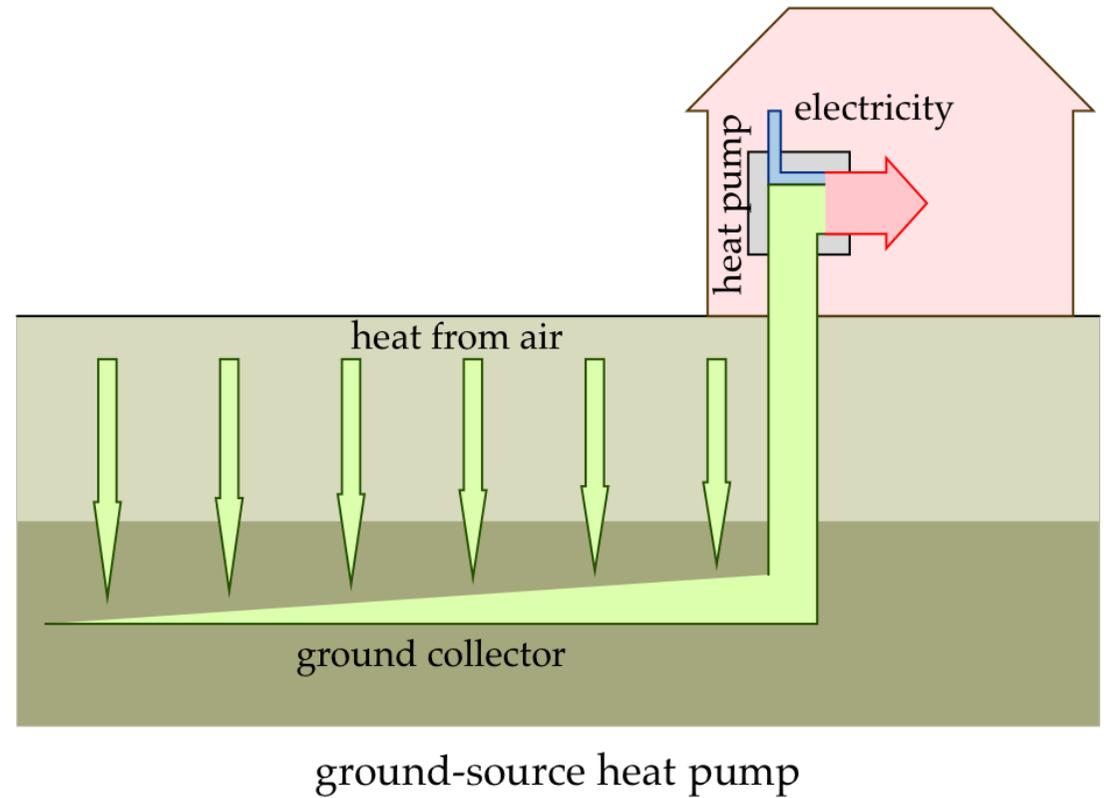
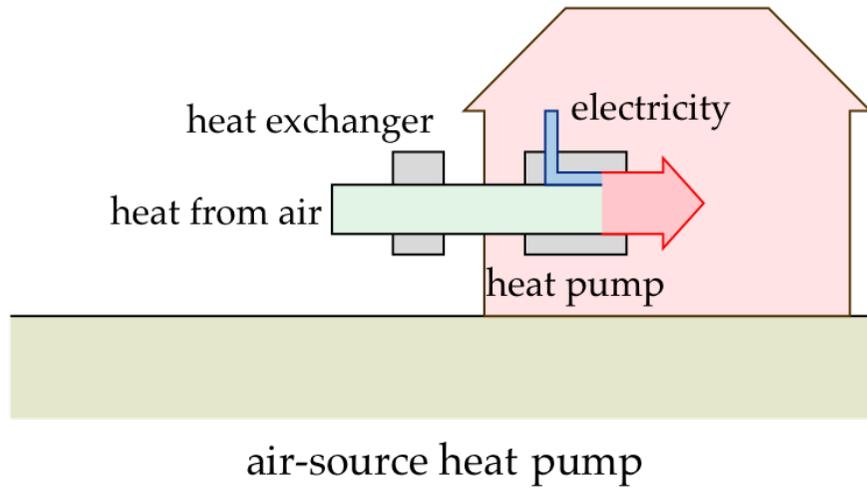


# Les énergies renouvelables sont très diffuses

Option	Puissance par unité de surface (W/m <sup>2</sup> )
Éoliennes terrestres	2
Éoliennes marines	3
Énergie d'écluse à marée	3
Énergie de flux de marée	8
Solaire photovoltaïque	5-20
Solaire thermique	50
Solaire concentré (mirroirs)	15-20
Hydro	11
Biomasse	0.5
Géothermie	0.02
<b>A comparer : nucléaire</b>	<b>~ 200 000</b>

Pour contribuer substantiellement, les 'centrales' renouvelables doivent donc être réalisables compte tenu de la superficie et de la localisation d'un pays

# Pompes à chaleur



# Rendements idéaux et réels

## A. Production de travail

$$\eta_c = \frac{\tau}{Q_c} = 1 - \frac{T_F}{T_C} = \frac{T_C - T_F}{T_C} < 1$$

$Q_c$ : quantité de chaleur cédée par la source **chaude**

$Q_F = Q_c - \tau$ : quantité de chaleur rejetée à la source **froide**

Exemple :  $\frac{1200 - 300}{1200} = \frac{900}{1200} = 75\%$

T: en Kelvin

$\tau$ : Travail produit

**Attention: Rendement réel moindre**

## B. Pompe à chaleur

$$\eta_P = \frac{Q_c}{\tau} = \frac{T_C}{T_C - T_F} > 1$$

$Q_F$ : quantité de chaleur **froide extraite**

$Q_c = Q_F + \tau$  quantité de chaleur **chaude produite**

$\tau$ : Travail utilisé

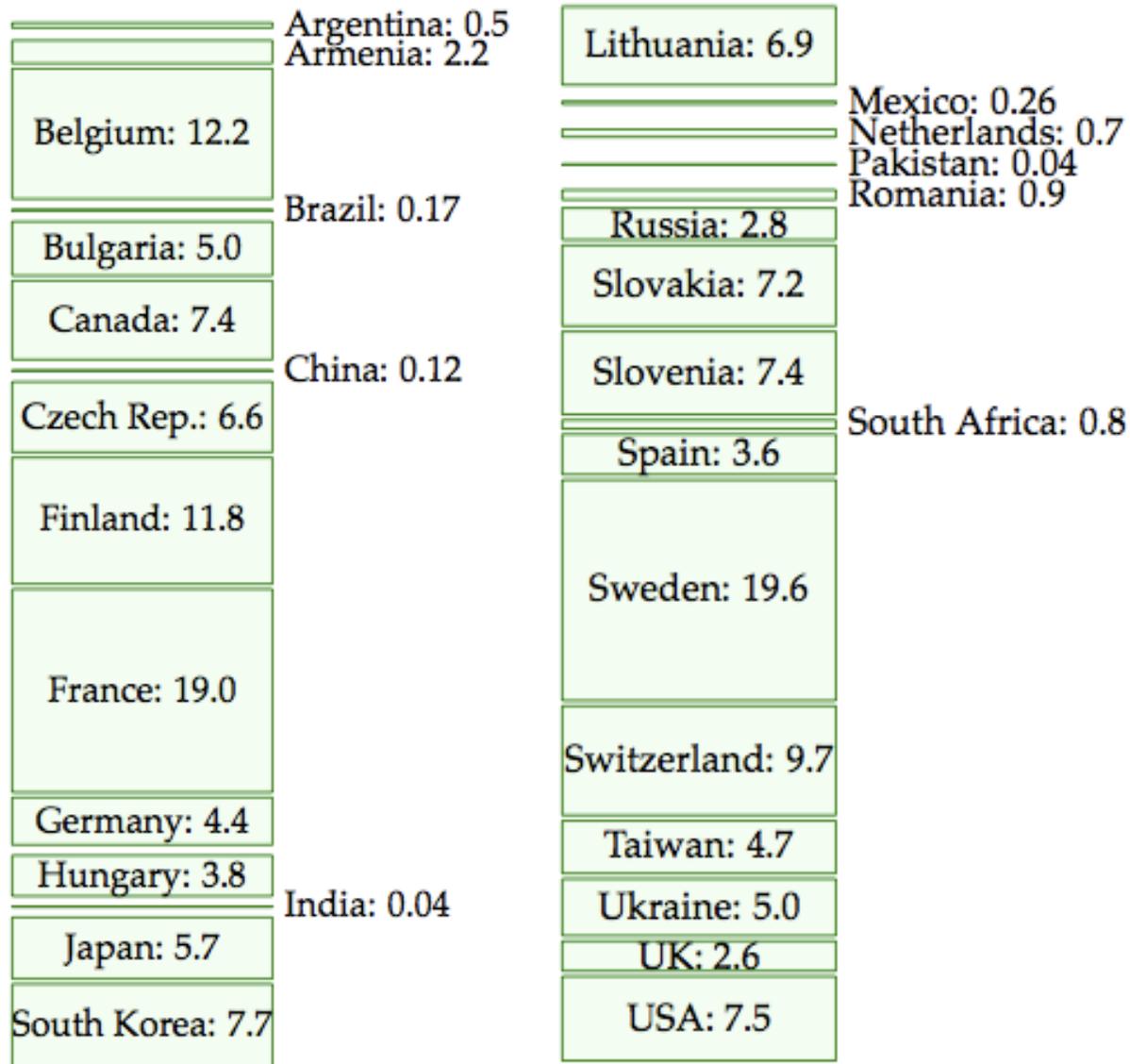
Exemple :  $T_C - T_F = 21^\circ\text{C} - 11^\circ\text{C} = 10^\circ\text{C}$  avec  $T_C = 21 + 273 = 284 \text{ K}$

$$\eta_P = \frac{Q_c}{\tau} = \frac{T_C}{T_C - T_F} = \frac{284}{10} = 28.4 \rightarrow Q_c = 28.4 \tau$$

**Attention: Rendement réel entre 3 et 5  $\tau$ . Cependant très significatif, particulièrement si l'électricité n'est pas d'origine chimique**

# Production d'électricité : Nucléaire actuel

## Production d'électricité nucléaire de fission en 2007 (kWh/journée-personne)



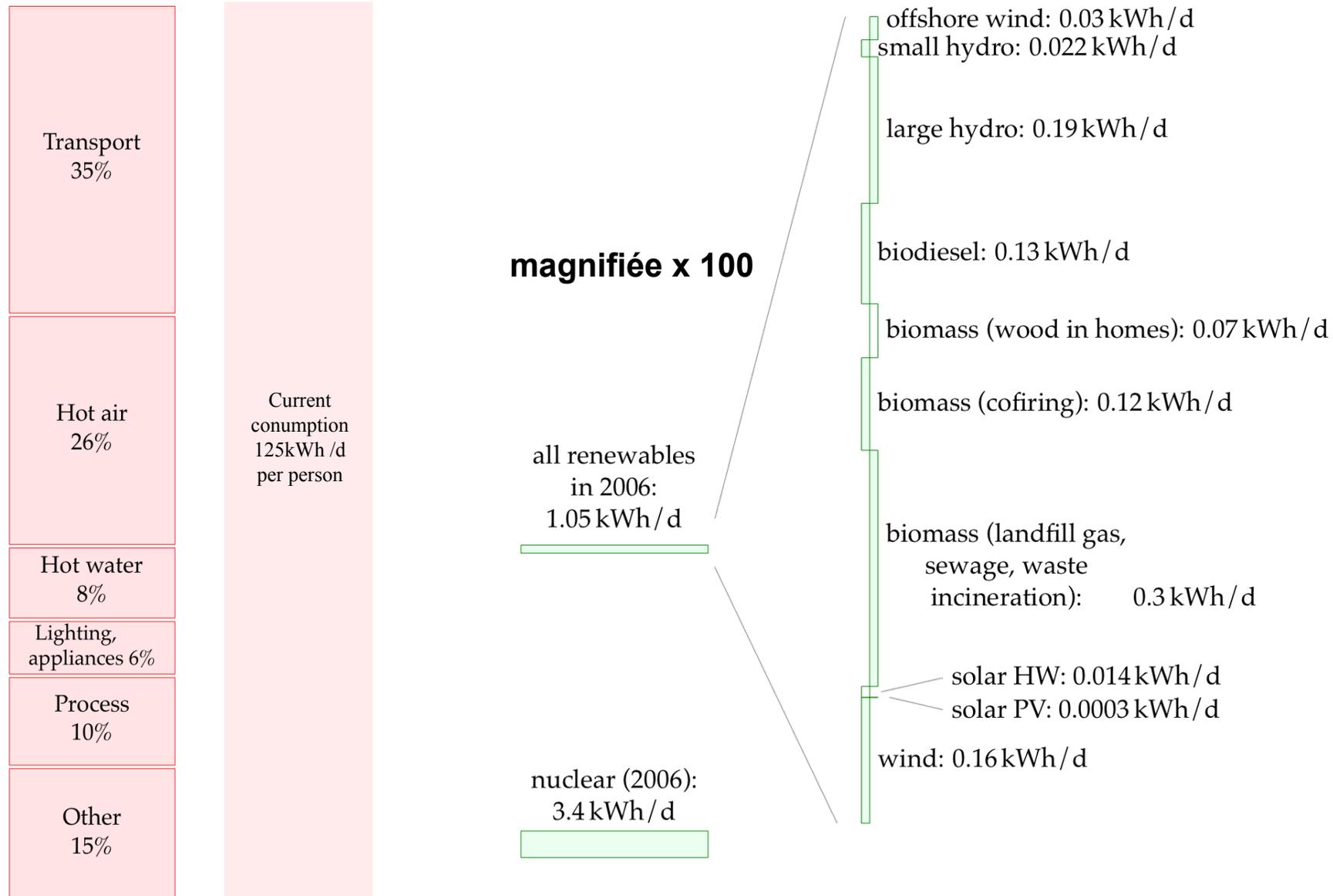
- En 1984 30GW nucléaire de fission construit en un an

- Depuis Three Mile Island et Tchernobyl, seulement ~ 75GW construit jusqu'assez récemment

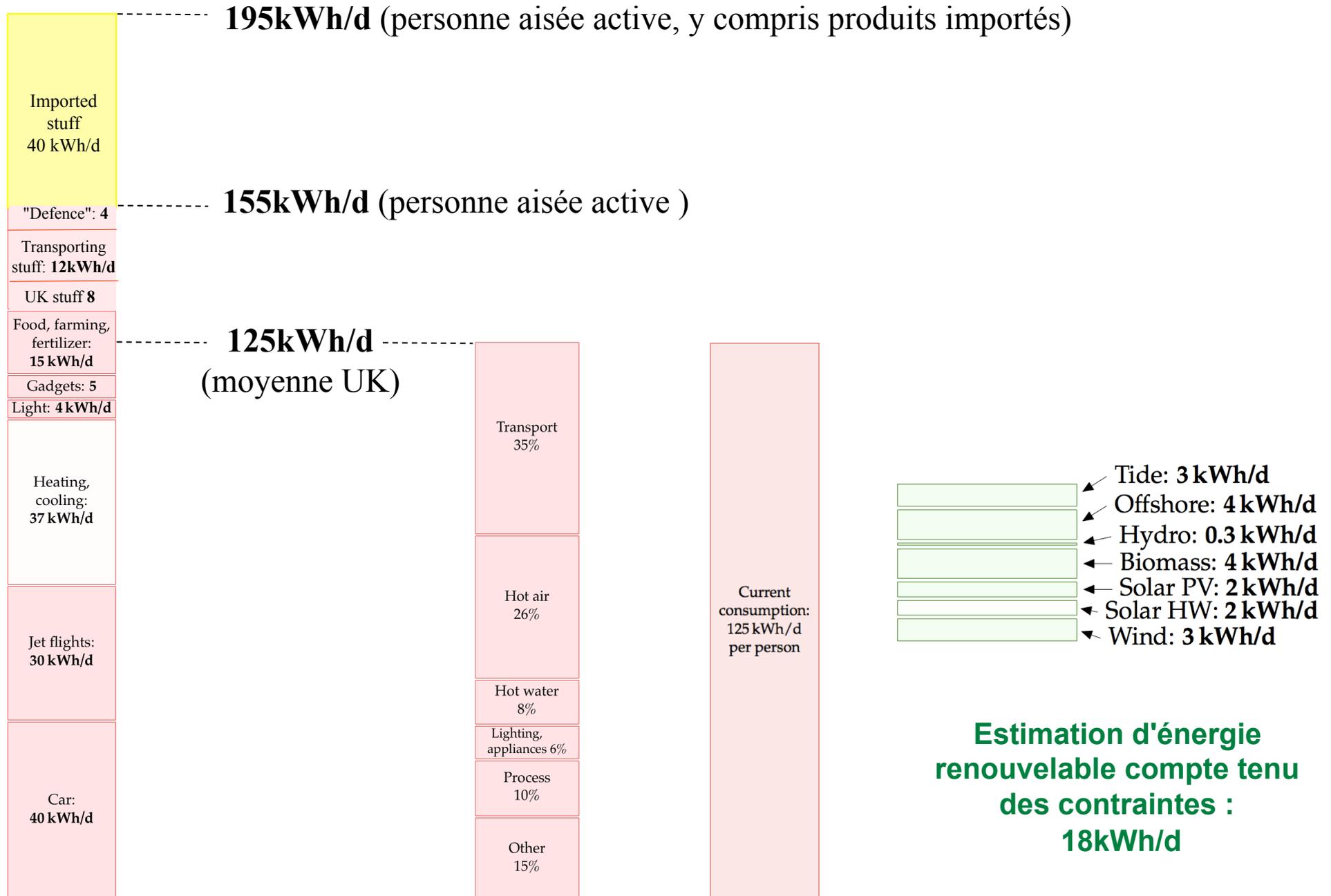
- Renouveau actuellement

# Consommation d'énergie actuelle (2008) au Royaume-Uni

## Utilisation (2006) du nucléaire et des énergies renouvelables



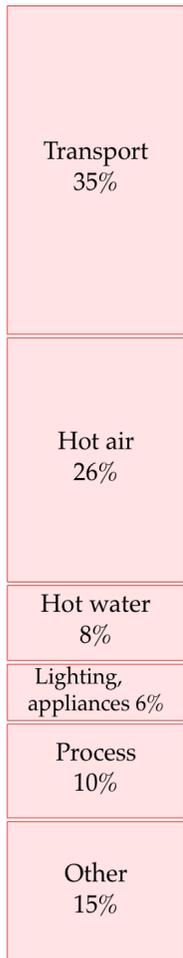
# Développements "verts" versus réalité sociale



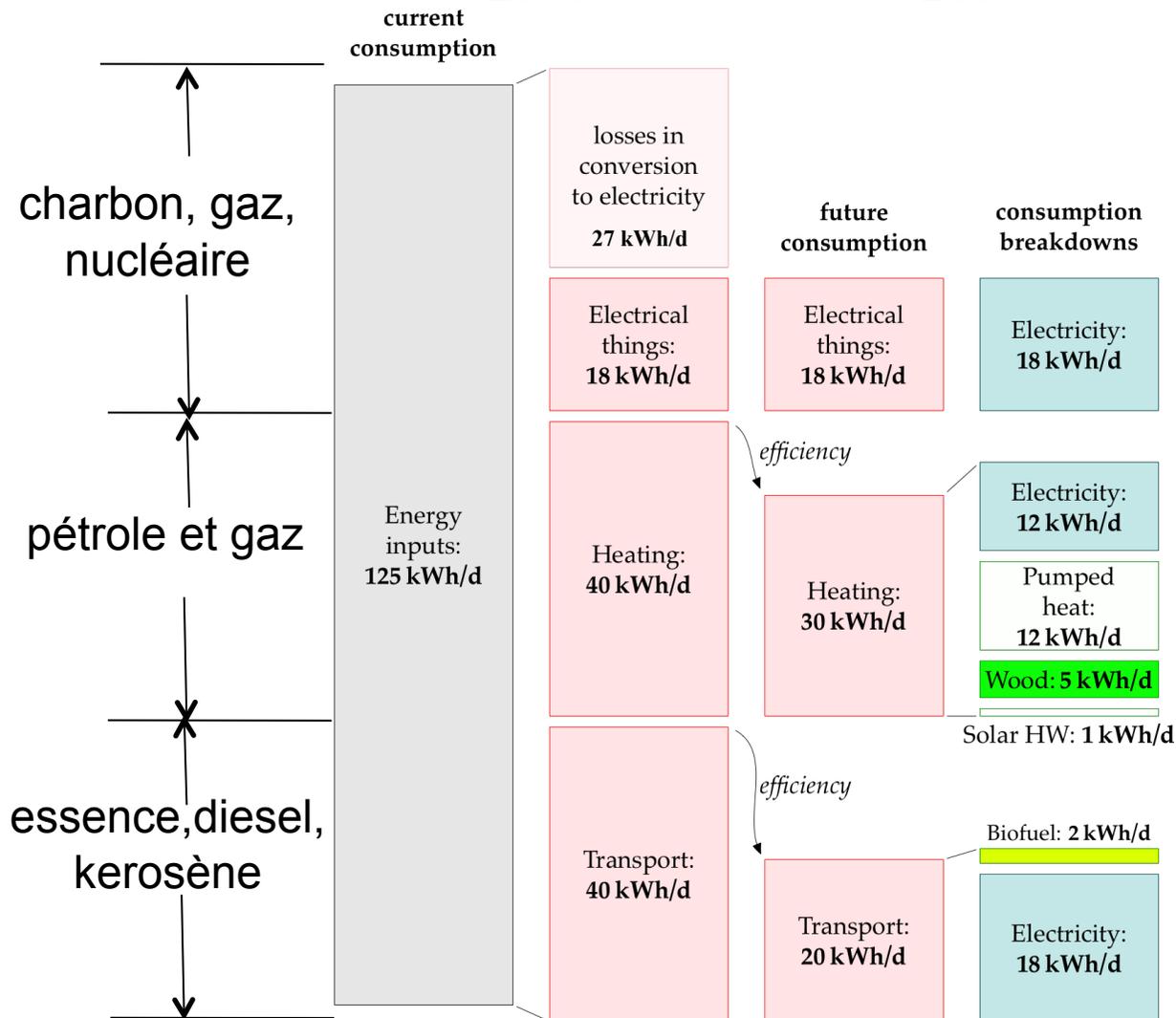
# Consommation d'énergie actuelle et future

Habitant moyen UK (schéma simplifié)

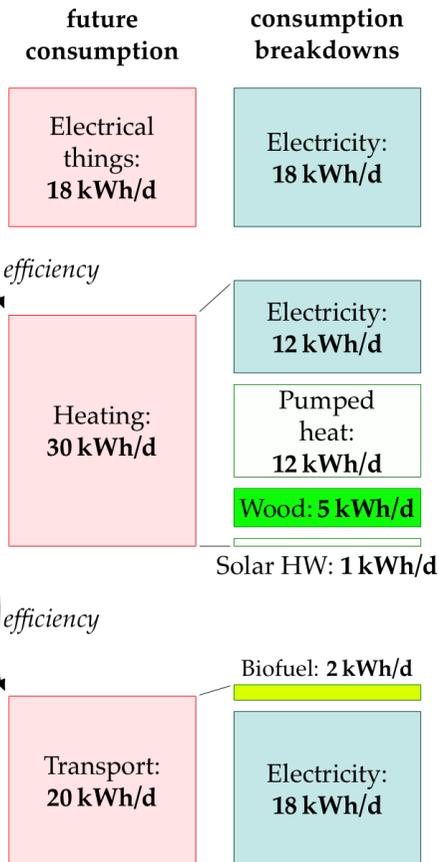
2008



2008

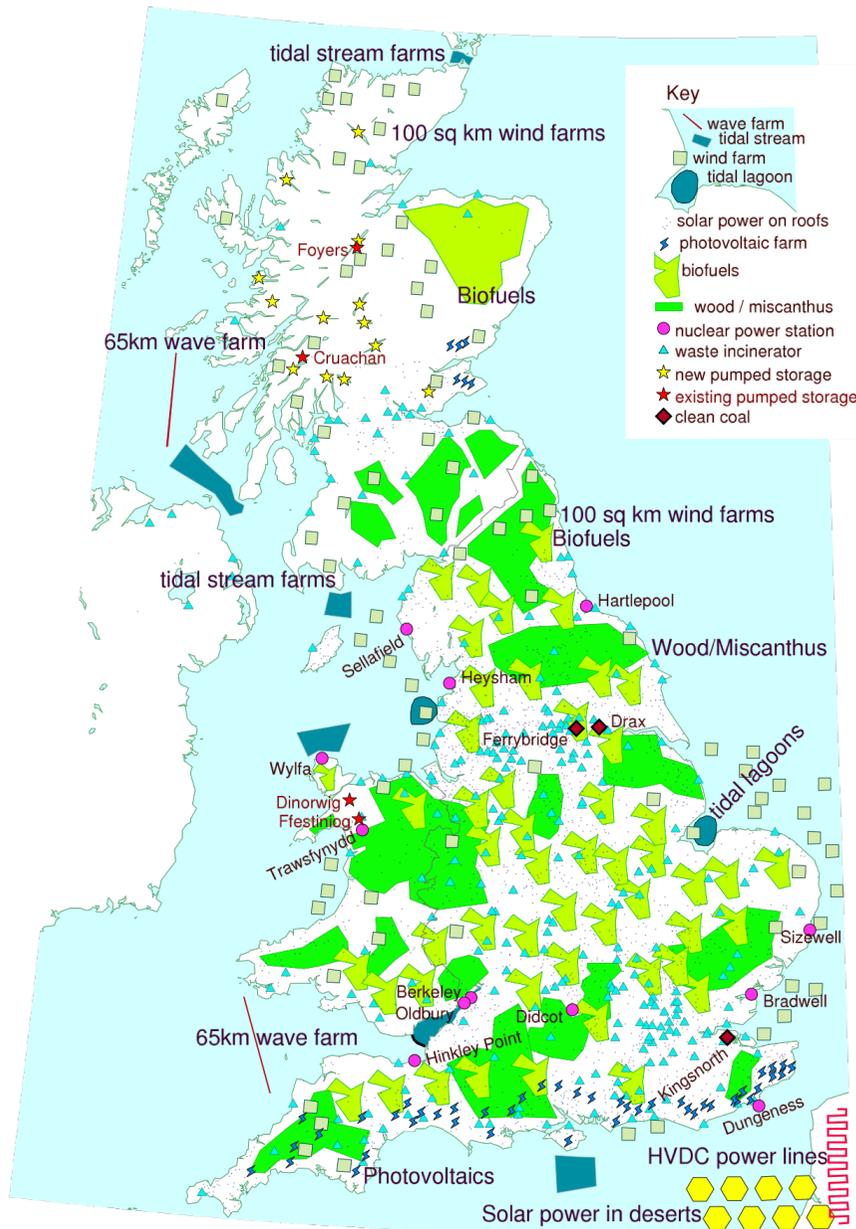


2050



68kWh/d

# Plan 'vert' moyen (réaliste?) pour le Royaume-Uni: Échelle des installations nécessaires.



68kWh/d  
**Total**

35kWh/d  
**Energie  
renouvelable**

Solar in  
deserts  
16kWh/d

Clean coal: 3

Nuclear:  
16 kWh/d

Tide: 3.7

Wave: 0.3

Hydro: 0.2

Waste: 1.1

Pumped  
heat:  
12 kWh/d

Wood: 5 kWh/d

Solar HW: 1

Biofuels: 2

PV: 2

Wind: 8

## Réaliste ?

Surface équivalente  
4 x Londres

Charbon propre

Nucléaire: 45 GW  
4 x plus que maintenant

Pompes à chaleur

Bois:  
25% de l'Angleterre

Solaire thermique:  
1m<sup>2</sup> /maison

Biocarburant

Solaire PV

Éolien:  
5200 km<sup>2</sup> terrestre  
2900km<sup>2</sup> marin

# Plan 'vert' moyen (réaliste?) pour le Royaume-Uni

## Investissements en surface et coût des installations (1ère partie)

	Puissance installée	Prix approximatif	Par habitant	Puissance moyenne livrée
52 onshore wind farms: 5200 km <sup>2</sup>	35 GW	£27bn	£450	4.2 kWh/d/p
	} (16GW average)	– based on Lewis wind farm		
29 offshore wind farms: 2900 km <sup>2</sup>		29 GW	£36bn	£650
		– based on Kentish Flats, & including £3bn investment in jack-up barges.		
Pumped storage: 15 facilities similar to Dinorwig	30 GW	£15bn	£250	
Photovoltaic farms: 1000 km <sup>2</sup>	48 GW	£190bn	£3200	2 kWh/d/p
		– based on Solarpark in Bavaria		
Solar hot water panels: 1 m <sup>2</sup> of roof-mounted panel per person. (60 km <sup>2</sup> total)	2.5 GW(th) average	£72bn	£1200	1 kWh/d/p
Waste incinerators: 100 new 30 MW incinerators	3 GW	£8.5bn	£140	1.1 kWh/d/p
		– based on SELCHP		
Heat pumps	210 GW(th)	£60bn	£1000	12 kWh/d/p
Wave farms – 2500 Pelamis, 130 km of sea	1.9 GW (0.76 GW average)	£6bn?	£100	0.3 kWh/d/p

# Plan 'vert' moyen (réaliste?) pour le Royaume-Uni

## Investissements en surface et coût des installations (2ième partie)

	Puissance installée	Prix approximatif	Par habitant	Puissance moyenne livrée
Severn barrage: 550 km <sup>2</sup>	8 GW (2 GW average)	£15bn	£250	0.8 kWh/d/p
Tidal lagoons: 800 km <sup>2</sup>	1.75 GW average	£2.6bn?	£45	0.7 kWh/d/p
Tidal stream: 15 000 turbines – 2000 km <sup>2</sup>	18 GW (5.5 GW average)	£21bn?	£350	2.2 kWh/d/p
Nuclear power: 40 stations	45 GW	£60bn – based on Olkiluoto, Finland	£1000	16 kWh/d/p
Clean coal	8 GW	£16bn	£270	3 kWh/d/p
Concentrating solar power in deserts: 2700 km <sup>2</sup>	40 GW average	£340bn – based on Solúcar	£5700	16 kWh/d/p
Land in Europe for 1600 km of HVDC power lines: 1200 km <sup>2</sup>	50 GW	£1bn – assuming land costs £7500 per ha	£15	
2000 km of HVDC power lines	50 GW	£1bn – based on German Aerospace Center estimates	£15	
Biofuels: 30 000 km <sup>2</sup>			(cost not estimated)	2 kWh/d/p
Wood/Miscanthus: 31 000 km <sup>2</sup>			(cost not estimated)	5 kWh/d/p

**Total : ~900 milliard £ ou ~15000 £ p.p.**

**Attention: sans coûts d'entretien et de remplacement**

# Plan vert pour l'Europe

Option	Production (kWh/jour-personne)
Éoliennes	9
Énergie houlomotrice	2
Marées	2.6
Hydro	6.4
Solaire PV	7
Solaire thermique	3.6
<b>Total :</b>	<b>30.6</b>
Nécessaire :	125 (88)
<b>Déficit :</b>	<b>~90 (~57)</b>

**Conclusion : énergie solaire dans les déserts africains**  
(450km x 450km = 1/2 x la France ou 6 x la Belgique)  
**et énergie nucléaire**

# Plan vert pour l'Amérique du Nord

Option	Production (kWh/jour-personne)
Éoliennes terrestres	42.0
Éoliennes marines	4.8
Géothermie	8.0
Hydro	7.2
<hr/>	
Total (non solaire) :	62
Nécessaire :	250 sans économies
<b>Déficit :</b>	<b>~190</b>

**Conclusion : énergie solaire dans les déserts américains**  
(600km x 600km = 1 x Arizona ou 16 x New Jersey)  
**et énergie nucléaire**

# Plan vert pour le Monde

Option	Production (kWh/jour-personne)
Éoliennes	24
Énergie houlomotrice	0.5
Marées	0.16-0.32
Hydro	3.6
Géothermie	8
<hr/>	
Total (non solaire) :	36.0
Nécessaire (niveau Hong Kong):	80
<b>Déficit :</b>	<b>~40</b>

**Conclusion : énergie solaire dans des déserts mondiaux  
(900km x 900km = 1/5 x Europe Occidentale)  
et énergie nucléaire**

## Conclusion du Professeur MacKay

Un bon plan 'vert' contient :

- 'Centrales' renouvelables à l'échelle du pays
- Énergie renouvelable 'importée'
- Beaucoup de nucléaire
- Augmentation de l'efficacité énergétique
- Changer notre mode de vie



'Okay - it's agreed; we announce - "to do nothing is not an option!" then we wait and see how things pan out...'

Lowe, Private Eye

## Conclusion : Population

---

Derrière toutes ces considérations est omniprésent le problème de la population.

En effet: si l'on parvenait à limiter l'augmentation de la population, on diminuerait non seulement l'ampleur des problèmes liés à l'augmentation mondiale de l'énergie et de la pollution mais aussi ceux cruciaux d'approvisionnement futur en eau et en nourriture de l'humanité.

# Le problème de l'énergie est très important et urgent

---

Time is short. We urgently need clear thinking, huge investment, and effective leadership.

**Jeroen van der Veer**  
Chief Executive  
Royal Dutch Shell plc

"Le temps disponible est court. Nous avons un besoin urgent de raisonnement rationnel, d'un énorme investissement, et d'un leadership éclairé et efficace."

