

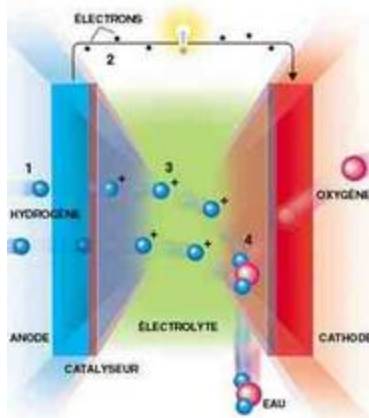
Aurons-nous de l'énergie pour demain?

Christian Ngô

Edmonium Conseil



edmonium@gmail.com

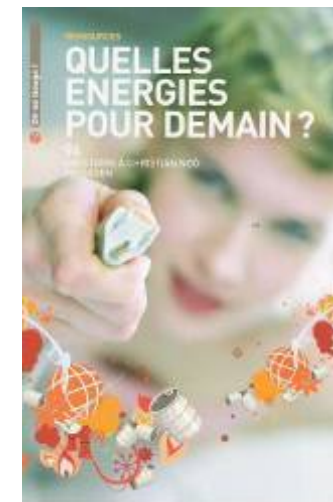


Pour en savoir plus

L'énergie : ressources, technologies et environnement ; C.Ngô, Dunod 2002

Energies alternatives : ECRI N, J.Bonal, P.Rossetti, Omnisciences 2007

Quelles énergies pour demain, C.Ngô, On se bouge ! Spécifique éditions



La consommation d'énergie

un problème de population et de niveau de vie

- ❑ La population augmente ($\approx 200\ 000$ habitants/jour)
- ❑ les pays en voie de développement (ou émergents) veulent augmenter leur niveau de vie ($2,8$ milliards d'habitants vivent avec moins de $2\$/$ jour)



Augmentation de la consommation énergétique

1kWh \Rightarrow

❑ 3,6 tonnes d'eau hauteur=100 m

❑ Camion de 10 tonnes à 100km/h

Le tep \rightarrow tonne équivalent pétrole

Le baril de pétrole = 159 litres

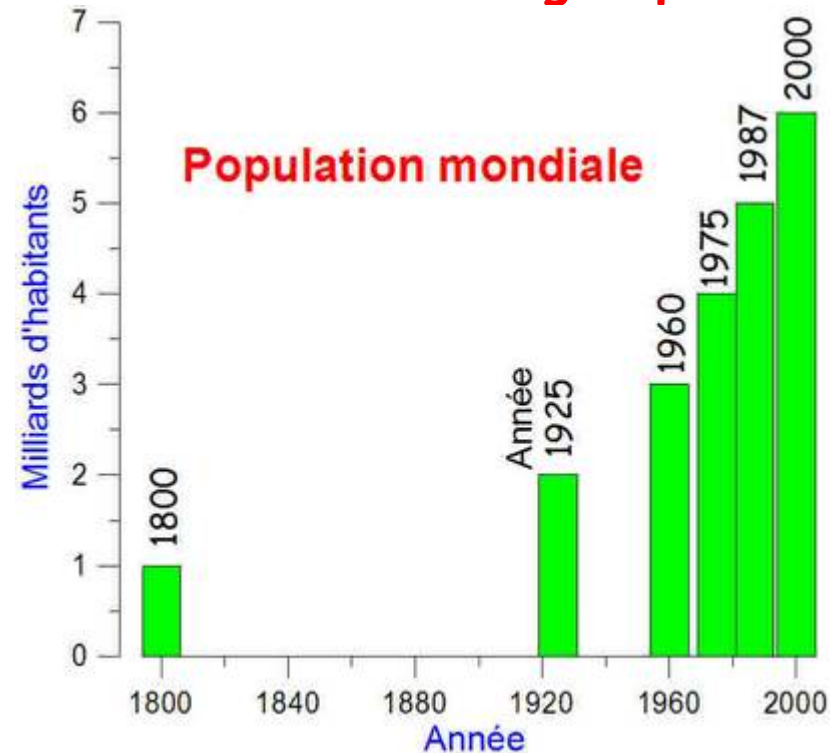
Consommation mondiale

1800 (estimation) \rightarrow

0,2 Gtep/an (≈ 1 Ghab);

1900 \rightarrow 1 Gtep ($\approx 1,7$ Ghab);

2000 \rightarrow 10 Gtep (= 6 Ghab)



En 200 ans, en France

Consommation énergétique

× par 14 par français (1,3%/an) ; × 28 pour la France (1,75%/an)
(population ×2)

Espérance de vie

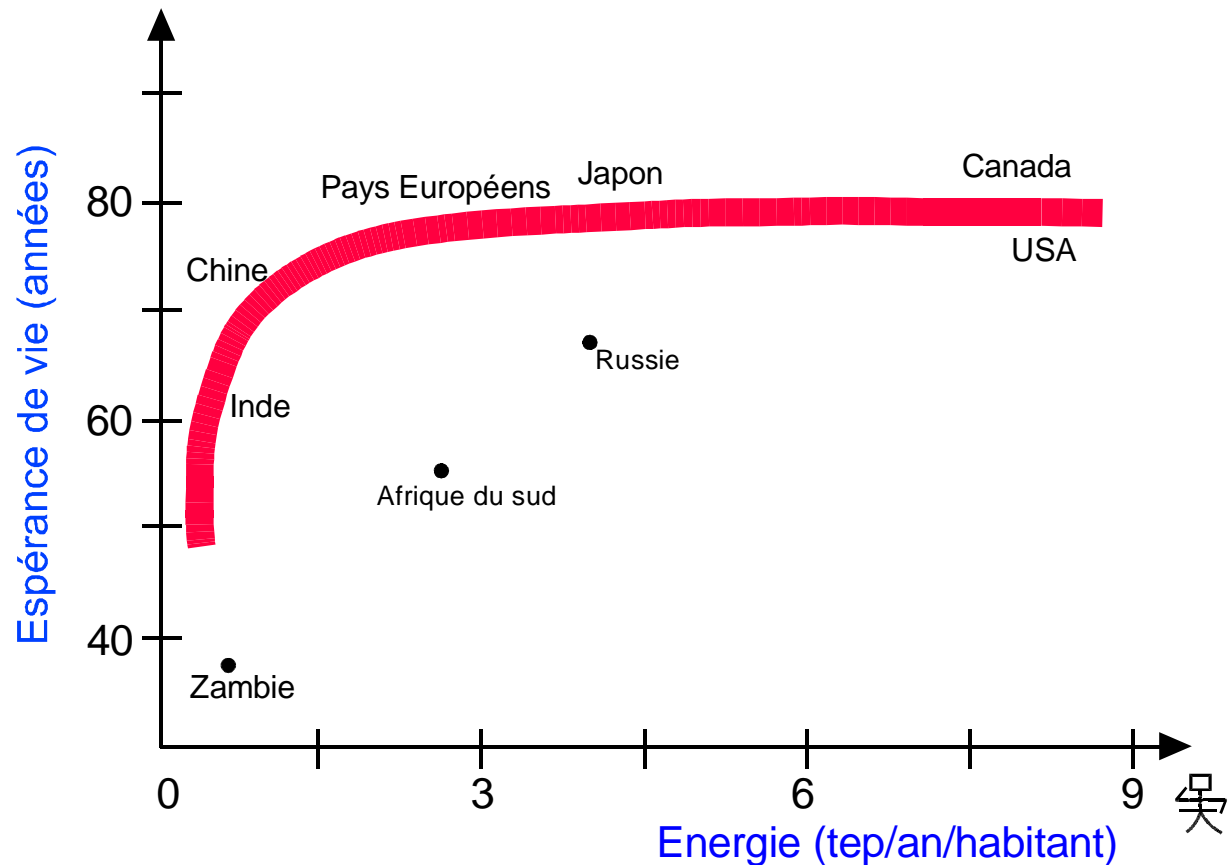
1780-89 => inférieure à 30 ans

1900 => environ 50 ans

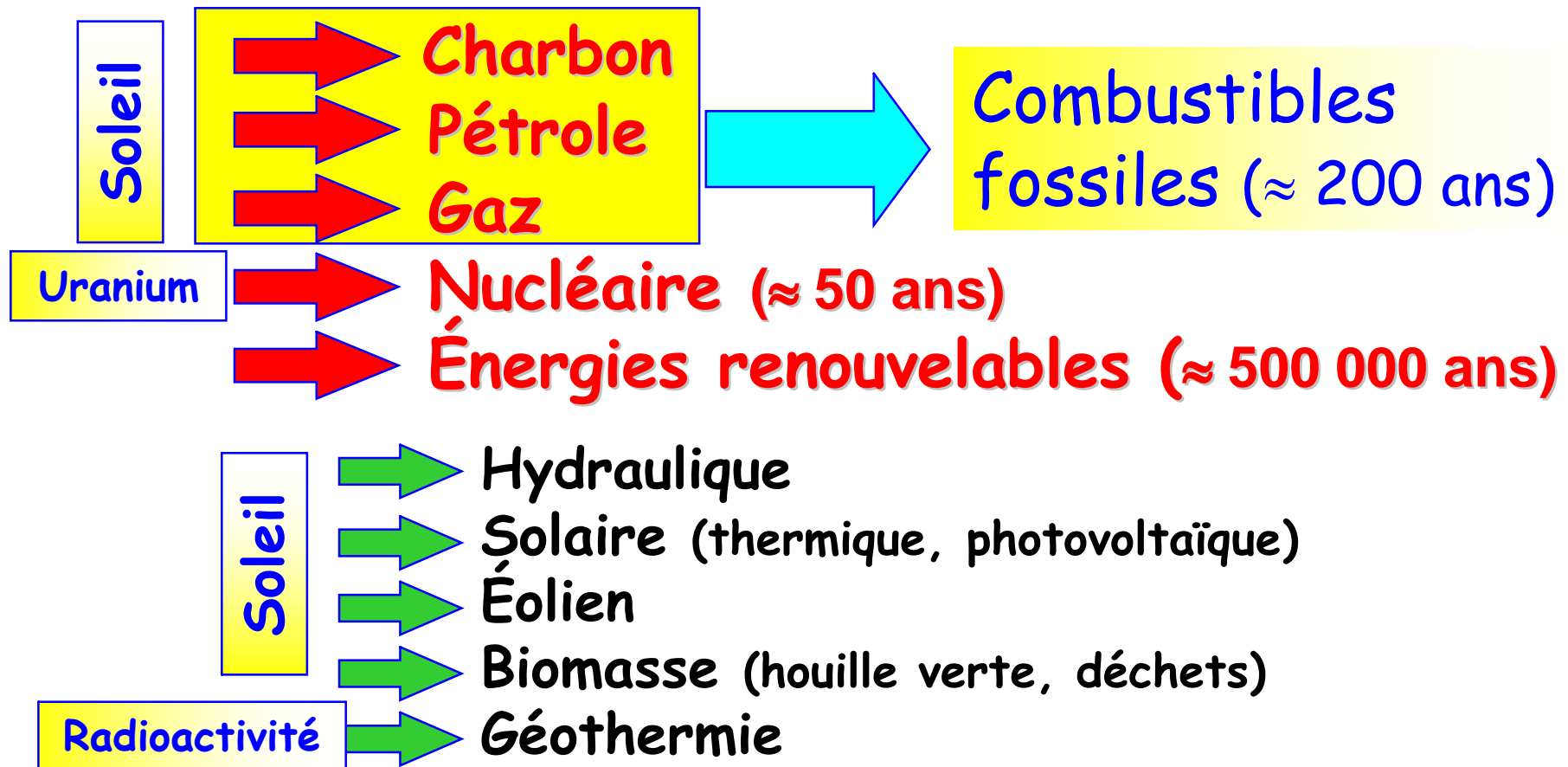
2006 => 80 ans

Dans le monde
6,6 milliards
d'habitants mais
1,6 sans
électricité

*L'espérance de vie
de ceux qui ont le
moins accès à
l'énergie est faible*

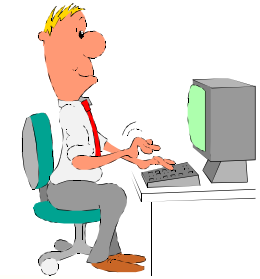


Sources d'énergie



La biomasse est renouvelable si l'on replante ce que l'on consomme

Énergie et l'homme



Énergie et vivant

□ L'homme a besoin de $\approx 2,7$ kWh/jour (métabolisme basal)

□ Grossesse ≈ 90 kWh

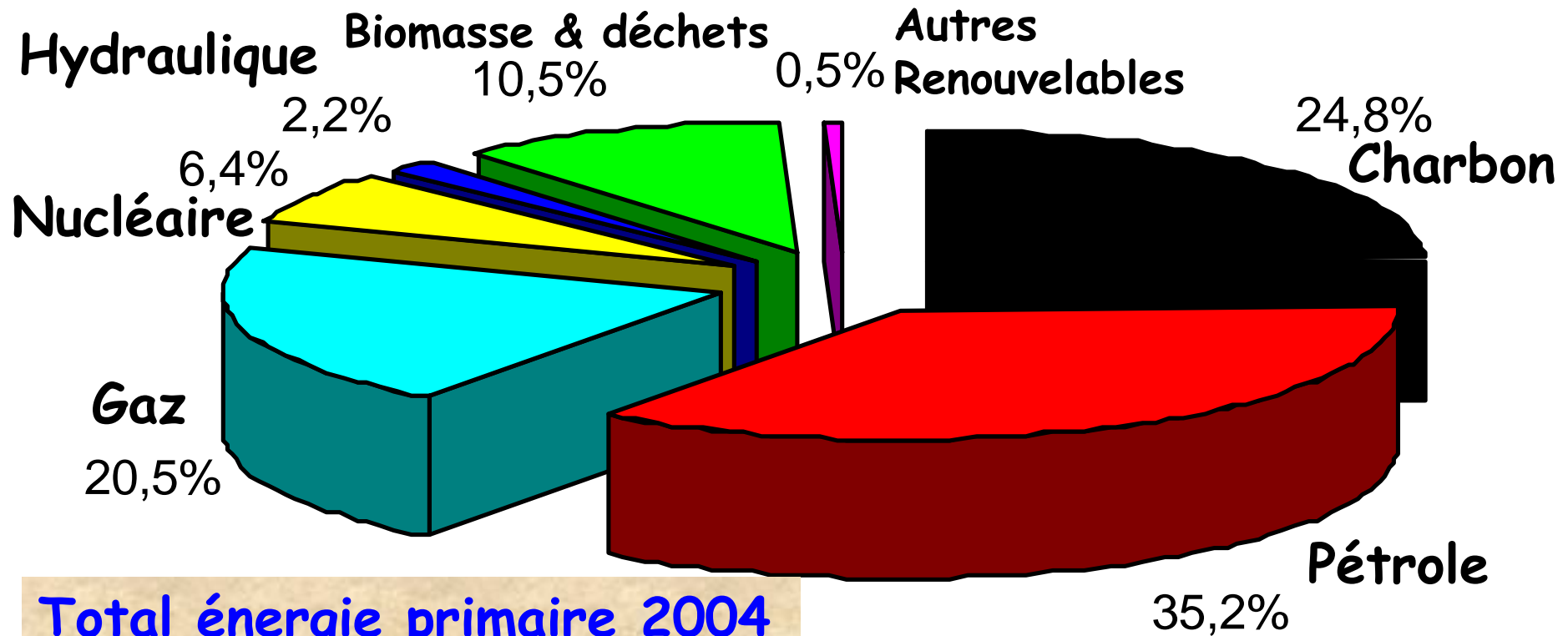
Soit moins d'une centaine de km en voiture

□ En France on consomme en moyenne 150 kWh/jour/français

⇒ **Nourriture** ⇒ équivalent à 500-600 Millions de tep ($\approx 6\%$ de notre consommation d'énergie totale)



Un monde dominé par les combustibles fossiles



Total énergie primaire 2004
⇒ 11,2 Gtep (IEA)

Combustibles fossiles
⇒ > 80% de dépendance

Le pétrole est encore bon marché (On trouve de l'eau minérale à 140\$/baril)

⇒ Le charbon une énergie d'avenir

Nous sommes très gourmands

Exemple provocateur

❑ Réfrigérateur français moyen : 380 kWh/an

❑ Électricité \approx 30€

❑ Retenue à 100m de hauteur + turbine pour produire de l'électricité $\Rightarrow \approx$ 1500 t d'eau

37 500 voyages avec 40 kg sur le dos

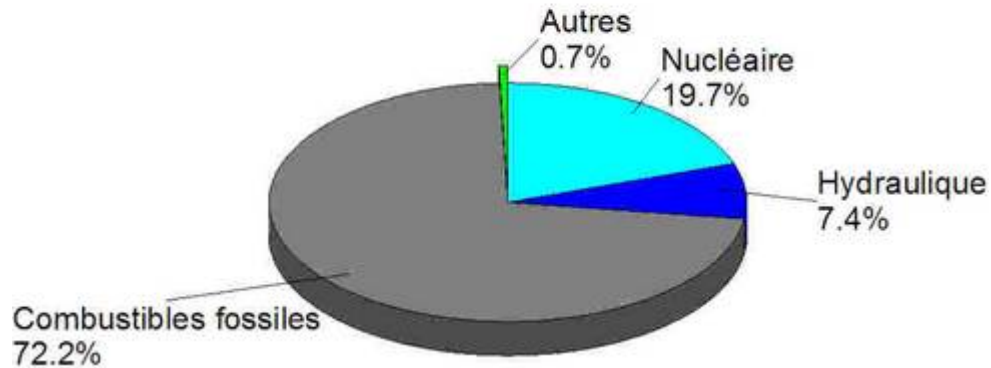
1 voyage \approx 30mn AR, à 12€/h (charges comprises)

\Rightarrow 225 000€

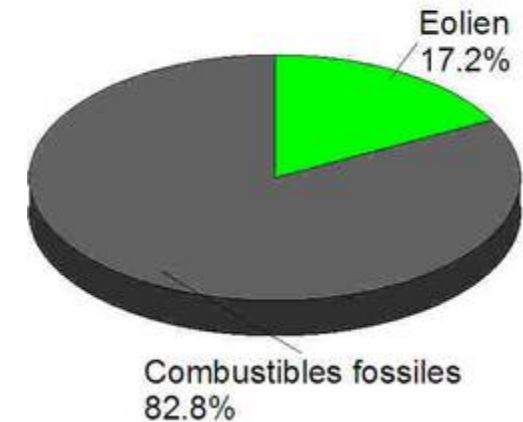
Une douzaine de personnes qui travaillent 8 heures par jour pendant un an

Production d'électricité (pas de solution unique)

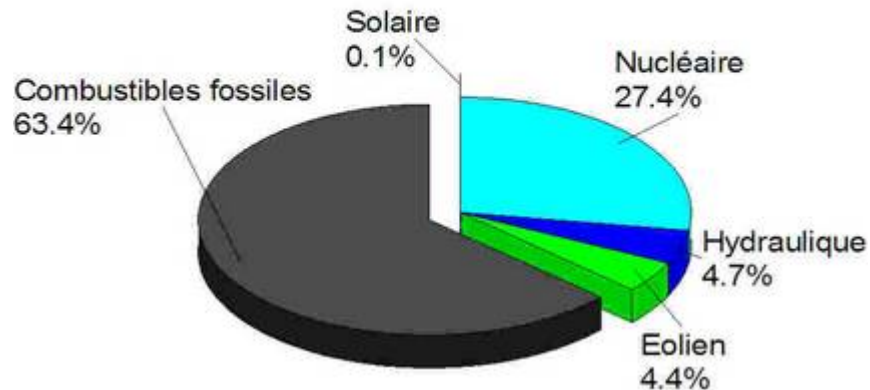
Production d'électricité
USA 2004



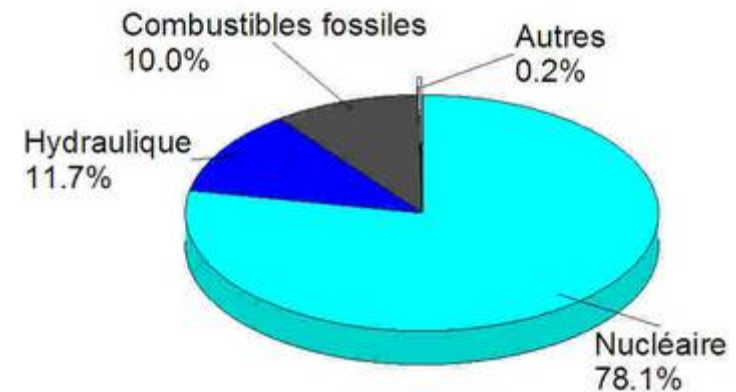
Production d'électricité
Danemark 2004



Production d'électricité
Allemagne 2004

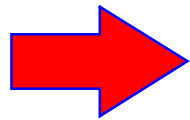


Production d'électricité
France 2004

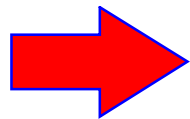


Dans la plupart des pays produire de l'électricité est très polluant

Les nouvelles contraintes



Accroissement de l'effet de serre



Énergies fossiles

- Répartition inégale sur la planète
- Variabilité des prix \Rightarrow perturbation de l'économie
- À long terme, raréfaction des ressources bon marché.

Conséquences \Rightarrow

- Changement climatique
- L'énergie va devenir de plus en plus chère

L'effet de serre



Sans effet de serre la température moyenne de la terre serait à **-18°C** . Elle de **$+15^{\circ}\text{C}$** . Mais on observe depuis l'ère préindustrielle une augmentation de celui-ci due aux activités humaines (plus de la moitié vient du CO_2)

On rejette 2 fois plus de CO_2 que la nature peut en absorber

Pour une 1 kWh électrique:

Charbon \Rightarrow environ 1000g de CO_2

Pétrole \Rightarrow environ 750 g de CO_2

Gaz \Rightarrow environ 500 g de CO_2

Le méthane est 23 fois plus nocif pour l'effet de serre que le CO_2 (gaz carbonique)

Émission annuelle en CO_2 par habitant

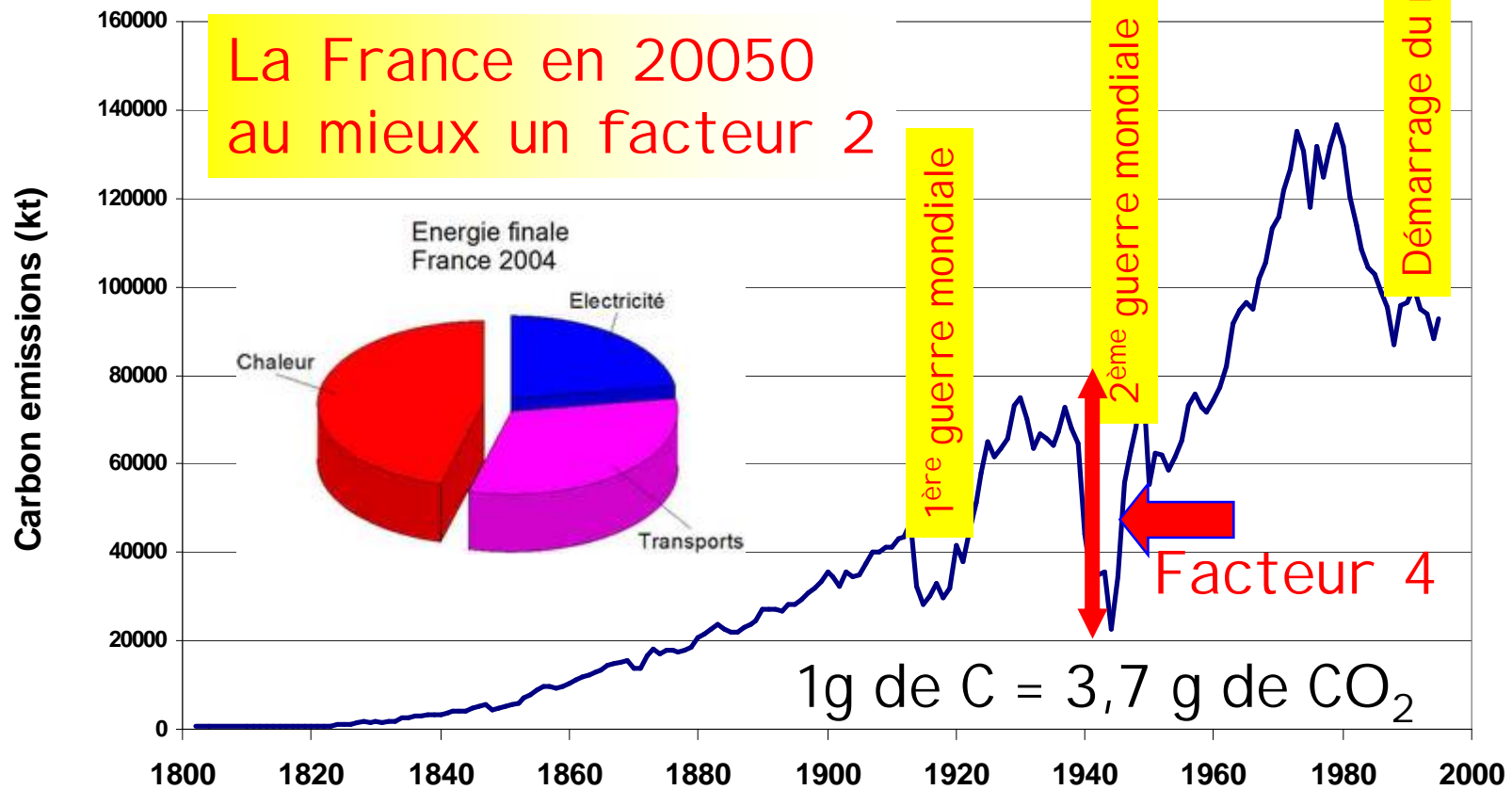
USA \approx 19 tonnes, **RFA** \approx 12t, **France** \approx 6,6t soit
1,8 moins qu'un allemand et 2,9 fois moins qu'un habitant des USA



Une voiture qui fait 15 000 km/an (\approx 200g CO_2 /km)
 \Rightarrow \approx 3 tonnes de CO_2 . Respiration humaine \approx 500 kg CO_2 /an

Le facteur 4 pour la France : une utopie

FRANCE - CO2 EMISSIONS



La France en 20050
au mieux un facteur 2

Source service d'études économiques du CEA

CO2DATABASE.XLS

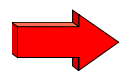
On rejette 2 fois plus de CO₂ que la nature peut en absorber (rejets ≈ 7Gt de C) ⇒ 500 kg C/personne/an ⇒ ≈ 10 000km en voiture ou 4-5m² de construction

Les combustibles fossiles



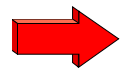
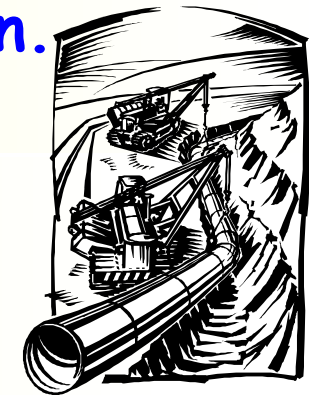
- ❑ Ils émettent tous du gaz carbonique
- ❑ Capture et stockage ? ... mais diminution du rendement. Il faudrait construire des milliers de centrales par an
- ❑ Il faut construire des milliers de centrales/an.

Réserves limitées



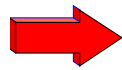
Le charbon

- Le plus polluant mais plusieurs centaines d'années de réserves. **Le charbon est l'énergie d'avenir**



Le pétrole (Prix réel : quelques \$ le baril)

- Le plus commode. La meilleure forme d'énergie
- Actuellement irremplaçable pour les transports.



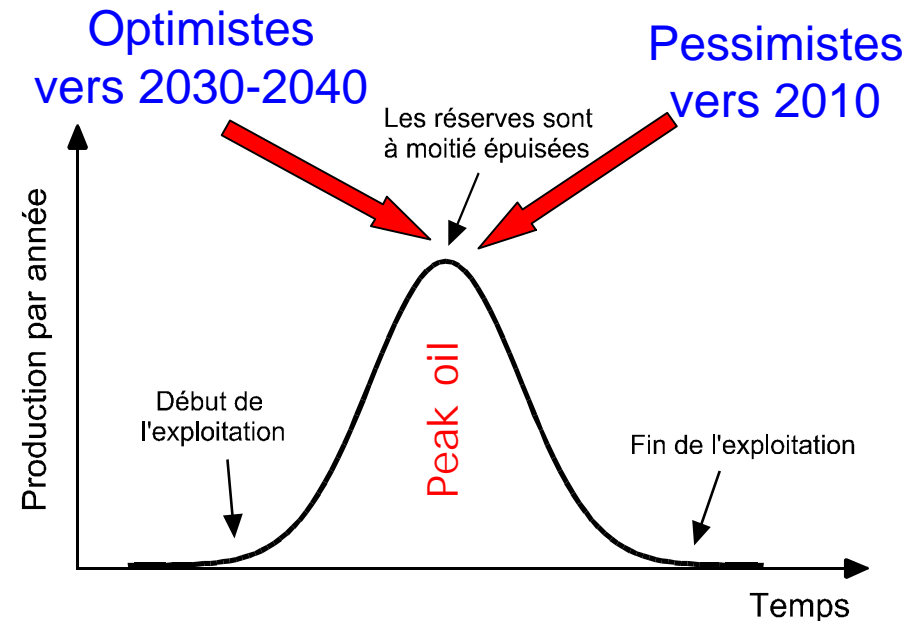
Le gaz

- Utilisation en croissance (turbines à cycle combiné ⇒ excellents rendements), le moins polluant des combustibles fossiles

Consommation de pétrole

Pays	Augmentation en 20 ans
Corée du Sud	306%
Inde	240%
Chine	192%
Brésil	88%
USA	16%
Japon	12%
France	-12%

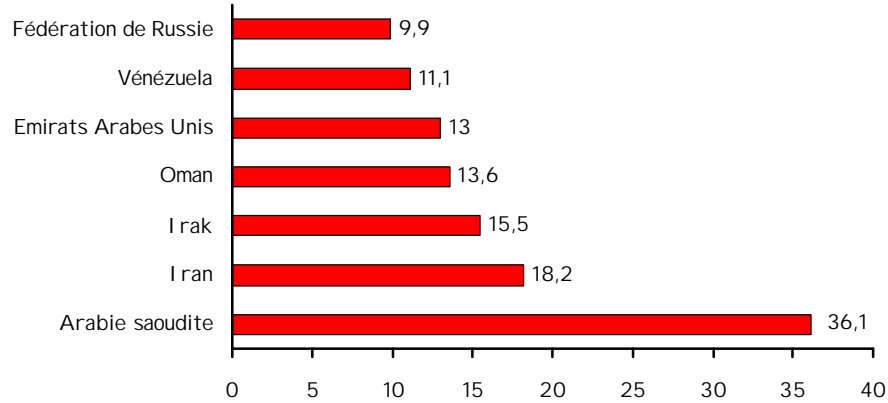
Quand la production du pétrole « bon marché » déclinera-t-elle ?



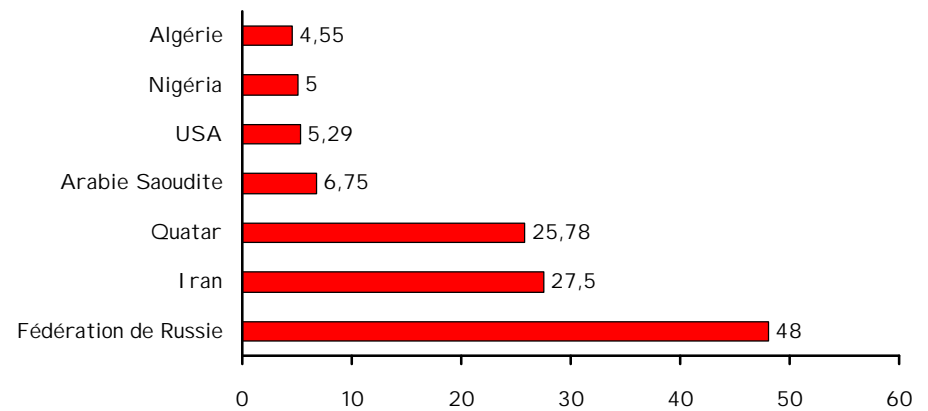
Prédiction de King Hubbert en 1956 \Rightarrow la production des USA déclinera en 1969 (réalité 1970)

En 2050 la production de pétrole \approx aujourd'hui ($\approx 3,5\text{Gt}$). Il manquera environ $3,5\text{Gt}$ si rien ne change dans le mode de consommation. $3,5\text{Gt}_{\text{ep}} \approx 2500$ réacteurs nucléaires ≈ 10 millions d'éoliennes de 1 MW

Réserves prouvées de pétrole



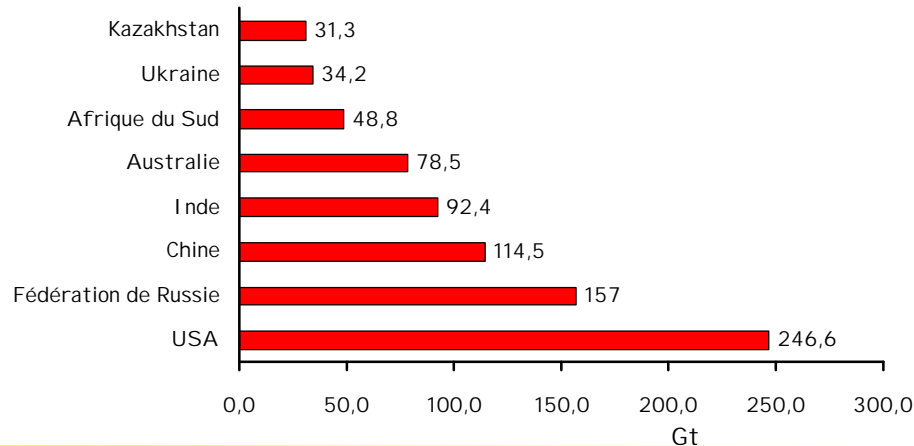
Réserves prouvées de gaz naturel (Tm³)



Pour le pétrole et gaz => dépendance + forte du Moyen Orient

Source BP statistical review

Réserves prouvées de charbon (2004)



Il y aura encore du pétrole pendant longtemps (non conventionnel, CTL, GTL, BTL), mais plus cher

+ pétrole non conventionnel, schistes bitumineux + sables asphaltiques => plusieurs centaines de Gtep. Mais coûteux en énergie et polluant à exploiter

On peut fabriquer du pétrole à partir du gaz, du charbon ou de la biomasse (GTL, CTL, BTL)

Les énergies renouvelables (ENR): de vieilles énergies (500 000 ans d'âge)

- ❑ ENR, 1 million de fois moins concentrées que les énergies fossiles elles-mêmes 1 million de fois moins concentrées que l'énergie nucléaire
1g de ^{235}U = 23 MWh. 1g de pétrole = 1,2 Wh
1g d'eau tombant d'une hauteur de 100m = 0,3 mWh
- ❑ La biomasse : fin du 18^{ème} siècle \Rightarrow on en manquait déjà
- ❑ Aujourd'hui : production de chaleur dominée par la biomasse, une production d'électricité dominée par l'hydraulique
- ❑ Paradoxalement on consomme plus de biomasse aujourd'hui et plus de monde en consomme qu'il y a 200 ans (1800, 0,2 Gtep, 1 Gha - 2000, 1 Gtep, 3Gha)
- ❑ Certaines sont **intermittentes et diluées, souvent trop chères**

Les énergies renouvelables

- ❑ Utiliser les ENR et d'autres technologies (renouvelables ou inépuisables) pour diminuer la consommation de combustibles fossiles mais pas pour les remplacer
- ❑ Il n'y a pas que la technologie. L'éducation et la formation jouent un rôle important. Source de nombreux emplois.
- ❑ Les ENR demandent et vont demander des investissements importants pour les particuliers. Il faut introduire de nouveaux modes de financement (analogues à ceux des pays pauvres)
- ❑ Il faut exploiter les technologies qui apportent un plus value à notre pays (biomasse...)
- ❑ Risques dans quelques années s'il n'y a pas de continuité 吳

La biomasse

- ❑ Déjà à la fin du Moyen-âge la biomasse devenait insuffisante pour assurer les besoins en énergie, construction, nourriture... Aujourd'hui on veut tout lui faire faire mais il faudra choisir.
- ❑ Pour l'exploitant la question est : qu'est-ce qui est le plus rentable ?

De multiples applications

- ❑ Alimentation
- ❑ Usage thermique
- ❑ Bioélectricité
- ❑ Biocarburants (amplificateurs d'énergie)
- ❑ Nouveaux matériaux
- ❑ Chimie végétale.

- ❑ Il n'y en aura pas assez de ressources pour tous ces usages



Ce qui va être précieux dans le futur : le carbone
Le vivant va jouer un rôle important dans ce domaine



La biomasse



La plante permet de stocker l'énergie solaire tout en consommant du CO_2 .

Faible rendement énergétique ($\approx 1\%$ zones tempérées)

Le bois \Rightarrow 1/3 moins énergétique que le pétrole

Biocarburants : un amplificateur d'énergie

Peuvent contribuer à diminuer les besoins en pétrole mais

\Rightarrow **Rouler ou manger**

Futur : biocarburants de 2^{ème} génération (Énergie+ H_2 de l'extérieur)

Biomasse marine : rendement 10 fois supérieur

Déchets

Déchets organiques très utilisés dans le monde (fiente de volaille, excréments de porcs...)



L'énergie solaire : l'avenir



☐ Le solaire thermique

Capteurs solaires (une source à développer)

Eau chaude sanitaire, planchers chauffants

Centrales solaires

On concentre l'énergie du soleil ($T > 1000^{\circ}\text{C}$) \Rightarrow électricité

☐ Le solaire photovoltaïque

Très cher pour le connecté réseau

(0,45 €/kWh > 10 fois le prix du kWh conventionnel)

Encore plus cher en autonome (1,5 €/kWh) mais rentable dans les **pays en voie de développement**

Technologie actuelle : beaucoup d'énergie pour fabriquer les cellules (4-5 ans de fonctionnement pour récupérer l'énergie)

Il faut faire un saut technologique (couches minces...)

Utiliser le vivant ?

Les autres énergies renouvelables

Hydraulique

Rentable mais saturée. Petit hydraulique

Energie des mers

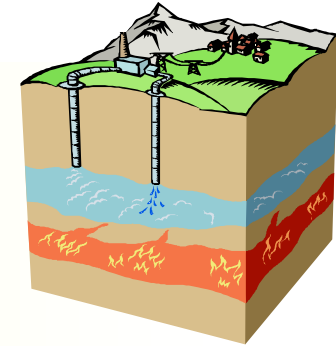
Bon potentiel pour la France (vagues, courants, Energie thermique des mers) mais trop che

L'éolien

Bientôt compétitif. Surtout rentable comme investissement. Il faut un complément quand il n'y a pas de vent (combustibles fossiles). En Allemagne il y a des éoliennes et pas beaucoup de vent (15% de rendement). En France 3 régimes de vent.

La géothermie

99 % de la planète a une température > à 200°C
Pas renouvelable mais inépuisable



L'énergie nucléaire

- ❑ Produit une électricité peu chère dont le prix est stable dans le temps (à l'échelle de 40-60 ans) ... mais demande de gros investissements initiaux.
 - Si le prix de l'U est multiplié par 10, le prix du kWh augmente de moins de 40%
 - Pour le gaz, $\approx 70\%$ du prix du kWh vient du prix du gaz. Un facteur 10 \Rightarrow prix du kWh $\times 7$



- ❑ Il ne contribue pas à accroître l'effet de serre
Évite 3,3 t CO_2 /hab/an si on utilisait du gaz ou 7,5 t CO_2 /hab/an si c'était du charbon. (voiture $\approx 3t CO_2$ /an)
- ❑ La valeur ajoutée se fait dans le pays qui l'utilise (emplois, devises...). Si on avait choisi le pétrole dans les années 70 \Rightarrow 1500€/français/an en devises pour un baril à 120\$. Soit $\approx 100G€$ (+ que budget de l'éducation nationale (66G€ en 2005))

Le nucléaire du futur

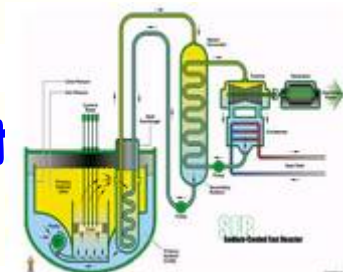
- ❑ Mais on n'utilise des réacteurs à neutrons lents (^{235}U , 0,7% de U naturel) et:
 - 1 kWh d'électricité \Rightarrow 2 kWh de chaleur rejetés
 - Ressources pour 1-2 siècles \Rightarrow valoriser ^{238}U \Rightarrow rapides

\Rightarrow réacteurs à neutrons les rapides (1 an d'uranium pour les REP actuels = plus de 140 ans de fonctionnement avec les rapides) \Rightarrow Réserves pour des dizaines de milliers d'années

Fonctionnement à haute température \Rightarrow 1kWh électrique pour 1 kWh de chaleur

Combustible pour 1 REP (40ans) \Rightarrow \approx 5 000 ans de fonctionnement dans un réacteur à neutrons rapides

Quand ? \Rightarrow Les rapides seront économiquement intéressants dans la plage 2050-2075



La fusion : énergie d'avenir... mais lointain

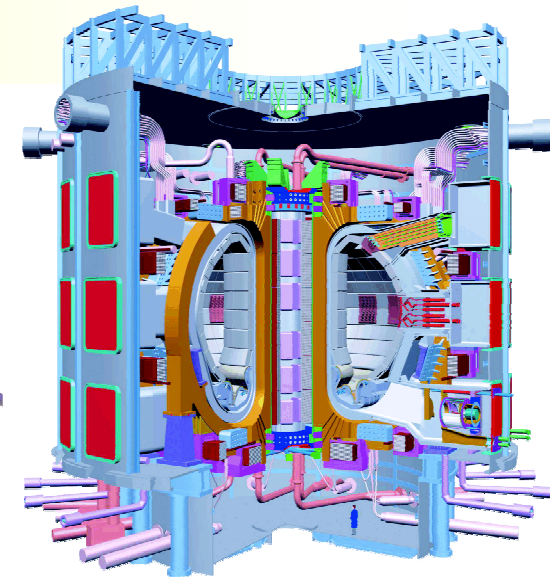
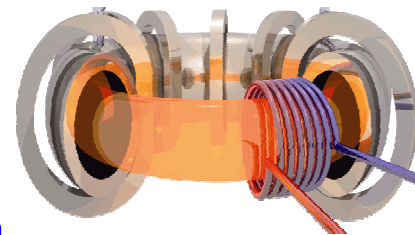
- (d+t) Au stade de la recherche. Réalisation industrielle \Rightarrow pas avant la fin du siècle, voire plus
- Réserves \Rightarrow quelques milliers d'années (+ avec eau de mer) (le tritium est fabriqué à partir du Lithium)
- Pour avoir une énergie inépuisable il faudra maîtriser la fusion d-d

Les projets (internationaux)

Jet 1kWh \Rightarrow 1 kWh

ITER 1kWh \Rightarrow 10 kWh

Pour faire de l'électricité il faut 1kWh \Rightarrow 40 kWh \Rightarrow (2 projets futurs DEMO et PROTO)



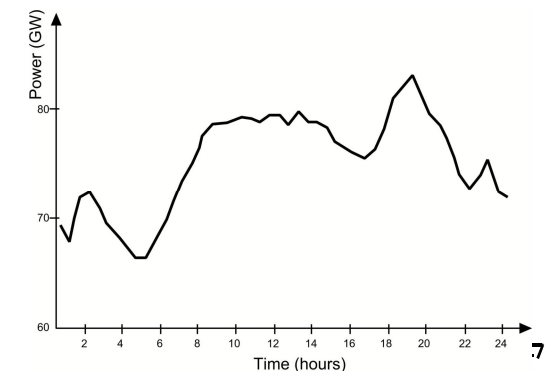
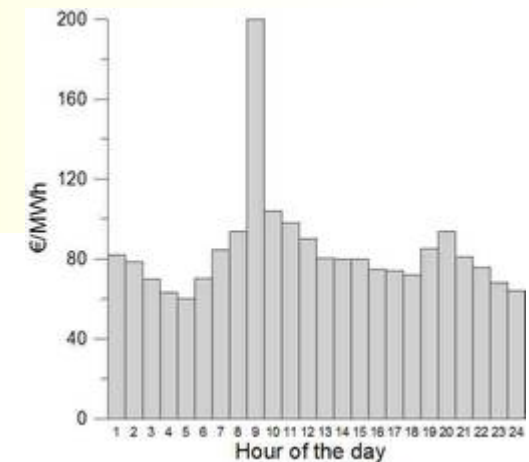
Le stockage de l'énergie

le point faible de la filière énergétique

Le consommateur veut avoir de l'énergie au moment et à l'endroit où il le souhaite

- Lisser la production (électricité: production = consommation, stockage intersaisonnier de chaleur, stocker pas cher pour vendre cher...)
- ENR intermittentes
- Électricité de bonne qualité

Matériau	Pour avoir 1 kWh
Essence	70g = 0,07kg
Batteries au plomb	25 kg
Eau	3600kg d'eau à une hauteur de 100m



Mieux valoriser la chaleur perdue (basse température)

La pompe à chaleur

Un amplificateur d'énergie

Coefficient de performance
 $Q =$ rapport entre la chaleur
fournie et l'électricité
consommée

Typiquement de l'ordre de 3-4

Source froide

Air
Eau
Sol

- ❑ Stockholm qui utilise la mer Baltique
- ❑ Tokyo qui utilise les eaux usées



Maîtrise de l'énergie

L'énergie la plus propre est celle que l'on ne consomme pas

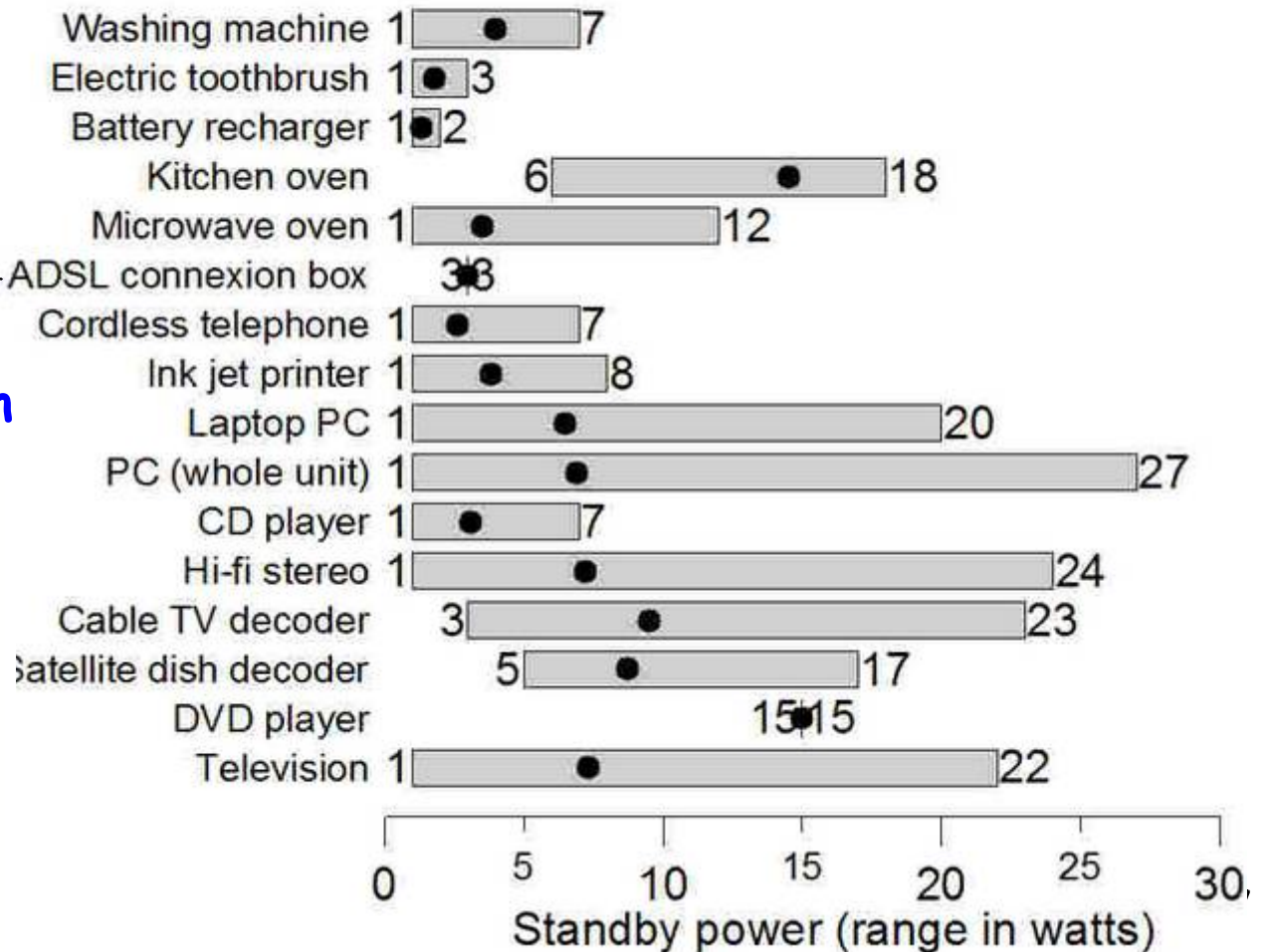
Veilles \Rightarrow Télévision (80 W) pour 3h \rightarrow 240 Wh
 veille (15W) pour 21h \rightarrow 315 Wh



>18 TWh/an

<7 TWh/an

Mieux utiliser
 l'énergie permettra
 aux pays riches de
 fortement diminuer
 leur consommation
 d'énergie



Urbanisme et bâtiments

- ❑ Le secteur du bâtiment
 - 43% de l'énergie utilisée en France
 - 21% des gaz à effet de serre
- ❑ Renouvellement du parc immobilier \approx 100 ans
- ❑ Transports associés à l'urbanisme (travail, courses, etc.)
 - Gain en isolation de 80 kWh/m²/an = 20 km/jour en voiture
 - Pour une famille \Rightarrow Chauffage + voiture > 80% de la consommation d'énergie

	Bâtiments construits avant 1975	Bâtiments neufs (RT 2000)	Objectif indicatif à atteindre
Chauffage (kWh/m ² /an)	328	80 à 100	50
Eau chaude sanitaire (kWh/m ² /an)	36	40	10

Ce qui est important ce sont les développements à grande échelle (pas les exemples médiatiques) + rénovation non invasive

Les transports routiers : le prochain défi

➔ **Le pétrole est indispensable pour les transports**
50 Mt = 1 700 Erika (30 000 t), 217 Amoco Cadiz (230 000 t)

➔ **Ordres de grandeur (France)**
Transports terrestres \Rightarrow 500 TWh, Aériens \Rightarrow 60 TWh
Maritimes \Rightarrow 30 TWh; Electricité \approx 450 TWh

Véhicules \approx 150 Wh/km. Puissance installée du parc automobile \approx 20 fois celle du parc électrique mais utilisée 5% du temps



➔ **À court et moyen terme**
 \Rightarrow **Véhicules hybrides** (électrique-thermique)
(recharge des batteries par l'électricité)
 \Rightarrow **Les biocarburants** (1^{ère} puis 2^{ème} génération)
 \Rightarrow **Les véhicules électriques (villes)**



➔ **À long terme ?**
Hydrogène (piles à combustibles) ?

Comment produire le carburant, avec quelle énergie ?



Hydrogène et transports

Ce n'est pas pour demain



Piles à combustible

Transport de masse : encore de nombreux problèmes

- Prix (1 million de \$ la voiture)
- Catalyseur (pour les véhicules il faut 280 fois la production annuelle de Pt... ⇒ autres catalyseurs)



Hydrogène + piles à combustible

Comment produire le carburant, avec quelle énergie ?

Stockage ⇒ on transporte le réservoir et très peu de H₂

Transports actuels ⇒ il faudrait 60 réacteurs nucléaires (1000 MW_e) ou 120 000 éoliennes (1,5 MW)

⇒ Essence à partir du charbon ≈ 60-80 \$/baril

Perspectives pour la France

□ **Sobriété et économies d'énergie**

□ **Chaleur** ⇒ Valoriser les pertes avec la pompe à chaleur qui est un amplificateur d'énergie

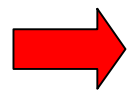
□ **Habitat** ⇒ utiliser plus les énergies renouvelables (chauffe eau solaire, pompe à chaleur,...)

□ **Transports** ⇒ véhicules hybrides rechargeables, biocarburants 2^{ème} génération, Les batteries gèreront la pointe d'électricité

On va avoir besoin de plus d'électricité produite sans émissions de gaz à effet de serre (nucléaire+ENR)

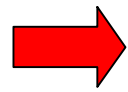
Conclusion

L'énergie va devenir plus chère



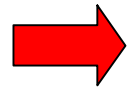
Faire des économies

En utilisant la technologie et l'éducation



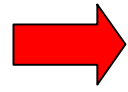
Trouver le meilleur panachage énergétique

Il dépend de chaque pays, de la région, du logement...



Utiliser toutes les sources d'énergies

Ce sera nécessaire pour satisfaire les besoins (déclin du pétrole bon marché)



La recherche est importante

Diminuer les coûts de l'énergie. Augmenter les rendements. Stocker l'énergie efficacement et à faible coût