



*Cycle de conférences du cycle CIEEIST (éthique des sciences en 1999-2000) Université de Paris-Sud
24 novembre 1999*

Bernard MULTON, Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan - LÉSIR

De l'énergie pour tous ?

Pour vivre, l'Homme a besoin d'air, d'eau et de nourriture mais également **d'énergie** (naguère du feu), pour :

- se nourrir,
- accéder aux soins médicaux et au confort,
- se déplacer,
- satisfaire sa curiosité (s'informer, découvrir...)

Aujourd'hui, 20% de l'humanité (pays industrialisés) consomme à elle seule les trois quarts de l'énergie primaire globale « manipulée ».

Qu'advient-il si, dans le siècle prochain, les 10 milliards d'hommes, qui vivront probablement, consomment autant que chaque citoyen américain aujourd'hui ?

Il est naturel de souhaiter à tous un accès équitable au confort, à l'information, donc d'une façon générale, à l'énergie.

En somme, les Droits de l'Homme pourraient être complétés par un droit à l'eau —on y réfléchit— mais également par un droit à l'énergie.

Nous posons alors la question suivante : Disposons-nous des ressources pour offrir à tous une telle consommation énergétique et cela ne met-il pas en danger l'équilibre subtil de la planète terre ?

C'est à la première partie de cette question que nous allons tenter de répondre dans cette conférence, en analysant la consommation humaine actuelle et les ressources dont nous disposons. Quant à la tolérance de la planète, système hautement complexe, nous la connaissons encore insuffisamment mais nous tenterons quelques analyses.

Nous proposerons enfin, en matière d'énergie, des voies pour un développement durable de l'humanité.

Bibliographie :

Colloque « L'énergie au XXIème siècle. Perspectives et considérations éthique », 14-15 avril 1999, UNESCO Paris.

1998 World Energy Outlook, International Energy Agency.

Observatoire de l'Energie, « Tableaux des consommations d'énergie en France », Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, document 1998.

Le guide de la maison économe, supplément de 60 millions de consommateurs 1997, conçu en collaboration avec l'ADEME.

B. CHABOT, « *Énergies renouvelables* » Encyclopaedia Universalis 1997.

M. AGUET, J.J. MORF, « *Énergie électrique* », collection des traités d'électricité de l'EPFL, Presses polytech. romandes 1987.

Site internet d'électricité de France, <http://www.edf.fr/>

Site internet de l'Institut Français du Pétrole, <http://www.ifp.fr>.

Site web de la société Shell sur les énergies renouvelables, <http://www.deutsche-shell.de/uebers/renew/solar.htm>.

Serveur internet du Commissariat à l'énergie atomique, <http://paprika.saclay.cea.fr>.

Serveur internet du Los Alamos National Laboratory, USA,
http://tritium.lanl.gov/energy_ressources.html.

Site web danois sur l'énergie des vagues, <http://www.waveenergy.dk/english.htm>

Site web de la société jamstec (énergie des vagues),

<http://www.jamstec.go.jp/jamstec/MTD/Whale/>

Numéro spécial de Pour La Science, nov. 1995, pp.138-142.

Site web de Solar Energy Industries Association, <http://www.seia.org>.

Site web sur la géothermie, <http://solstice.crest.o...thermal/gtc/supply.html>

P. LAVY, « L'usine de la Rance : 30 ans d'exploitation », REE n°9, oct.97, pp.6-10.

B. BONDUELLE, B. IVOIRE, A. FERRIERE, « *La centrale expérimentale Thémis : bilan et perspectives* », Revue de Phys. Appl., avril 1989, pp.453-461.

P. CREOLA, « *Space and the Fate of Humanity* », Symp. Space of service to Humanity, 5-7 feb. 96, Strasbourg., pp.3-14.

B. MULTON, « L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. », Revue 3E.I n°13, septembre 98, pp.29-38.

B. MULTON, « *L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production.* », Journées électrotechnique du club EEA, 28-29 janvier 1999, Paris, 8 p.



De l'énergie pour tous ?

L'énergie

Ressources énergétiques de la planète

Population humaine et consommation énergétique

Énergie électrique :

consommation et production propre

Perturbations liées à l'activité énergétique

Bilan



De l'énergie pour tous ?

Unités d'énergie

Système international : le **joule J**

1 J = 1 newton x 1m

= 1 volt x 1 ampère x 1 seconde = 1 V x $6,2 \cdot 10^{18}$ électrons

4,18 J accroissent de 1°C un gramme d'eau

Facture d'électricité : le **kilowatt.heure kWh**

1 kWh = 3600 000 J = $3,6 \cdot 10^6$ J (MJ)

Carburants : **tonne équivalent pétrole tep**

1 tep \Leftrightarrow 11 600 kWh

Puissance

Le **watt** : 1 watt = 1 J/s ou 1 Wh/h





De l'énergie pour tous ?

Formes de l'énergie

Chaleur

Travail mécanique

Rayonnement

Chimique

Electricité

Matière : $E = m.c^2$

Dans l'univers, la matière se dégrade inexorablement en chaleur.



De l'énergie pour tous ?

Vie de l'énergie

réactions nucléaires de fusion dans les étoiles



rayonnement transmis dans l'espace



chaleur interceptée



photosynthèse =>



effet photo-électrique

biomasse



cycle de l'eau



combustibles



électricité



CHALEUR





De l'énergie pour tous ?

Les besoins en énergie des Hommes

Transports (Hommes et biens) :

1 h/j en moyenne de 200 à 50 000 km/an

Cuisson

Chauffage : besoin très dépendant du climat

Froid

Eclairage

Travail mécanique agricole, industriel

Process divers de l'industrie

Traitement de l'information

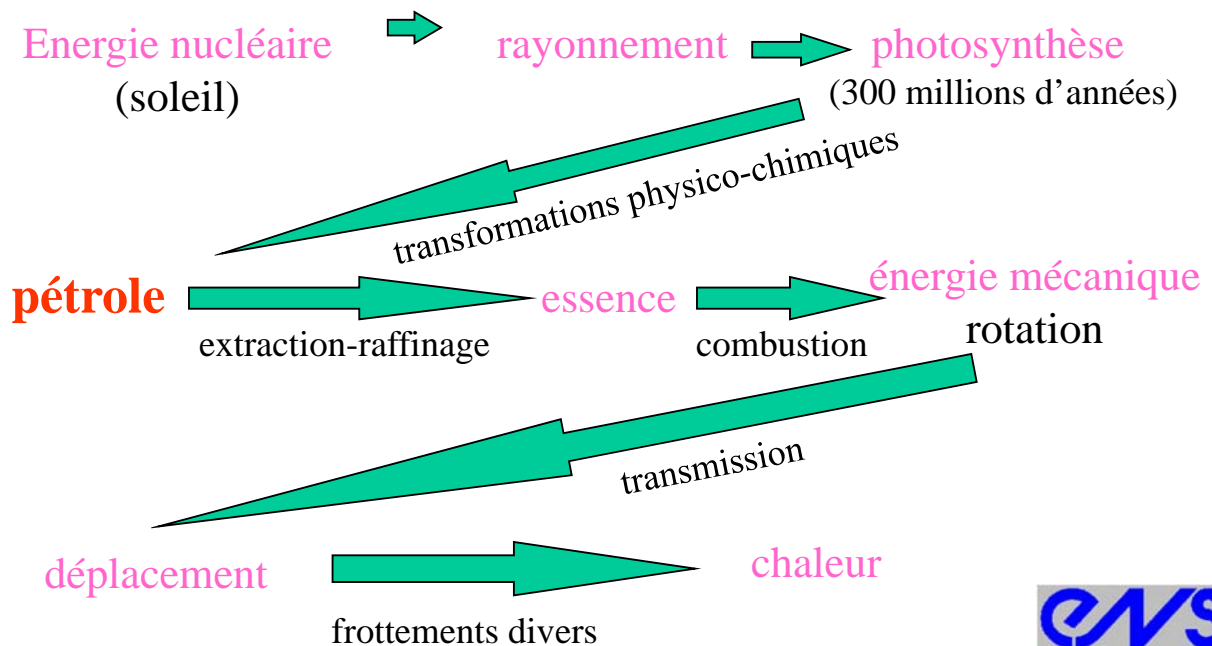
Divers



De l'énergie pour tous ?

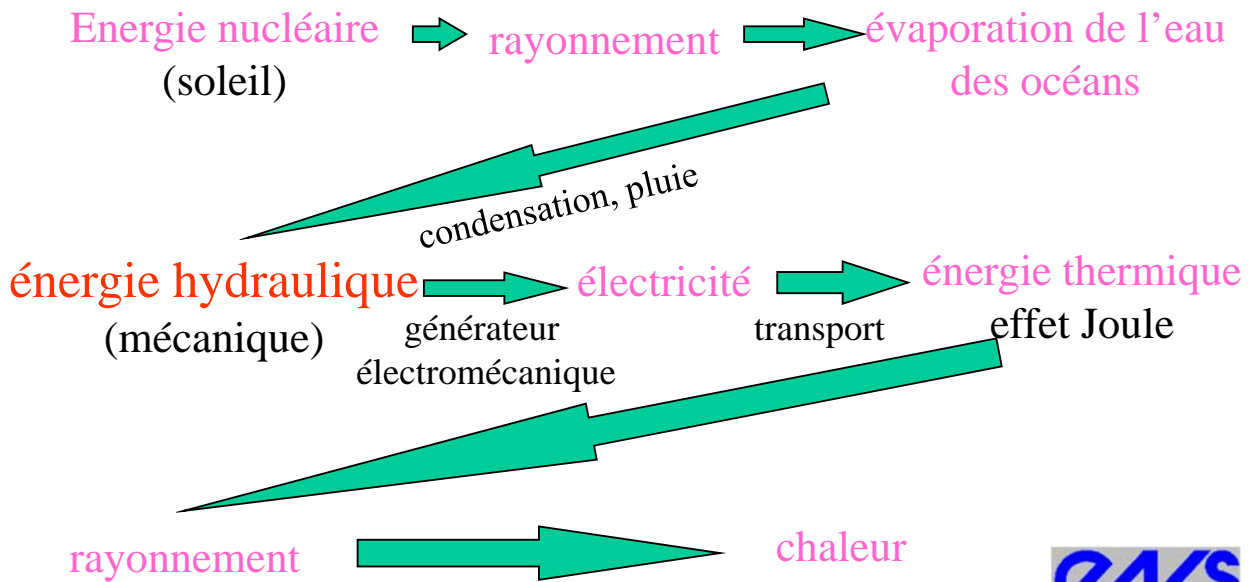
Exemples de transformation énergétique

1-Transports





2-Eclairage électrique à incandescence



Les sources primitives

LE **FEU** à partir du bois ou d'huile : il a servi à presque tout

LA **FORCE ANIMALE** (bœufs, chevaux, chiens...)

L'**EAU** des rivières et des marées (moulins, forges...)

LE **VENT** (pompes, moulins...)



LES **COMBUSTIBLES FOSSILES**

AV J.C. Chine : forages pétrole, XIII^e siècle : charbon, début 1800 : gaz de houille, 1930 : gaz naturel





Les sources modernes

L'ÉLECTRICITÉ (début au XIX^{ème} siècle) : ce n'est pas une énergie primaire, mais une forme intermédiaire , stockage cher.

LE FEU MODERNE : L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

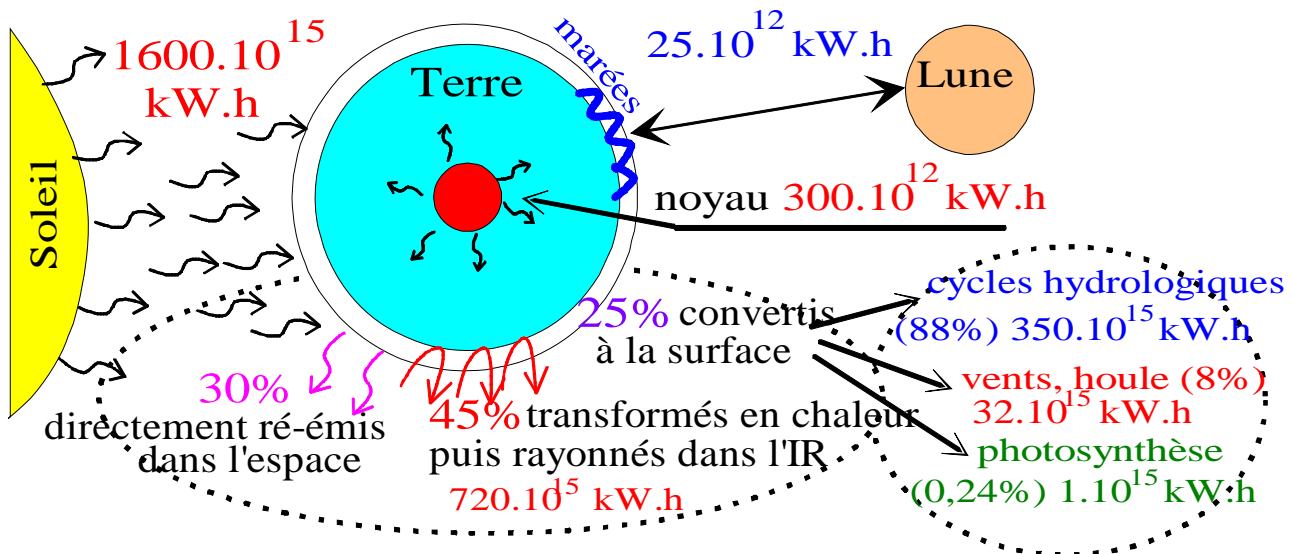
utilisation industrielle depuis les années 1940.

L'HYDROGÈNE prometteur mais encore marginal.



Ressources énergétiques de la planète

[consommation humaine 1998: environ 130.10¹² kWh]





De l'énergie pour tous ?

[consommation humaine 1998:
130.10¹² kWh et 13.10¹² kWh électriques]

part exploitable des énergies renouvelables

SOLEIL

rayonnement :	1% des 720.10 ¹⁵ kWh =	5000%
hydraulique :		15%
vent : terrestre (plus en offshore)		40%
houle :		0,07%
biomasse :		50% à 700%

GÉOTHERMIE

basse température (50 à 90°C) :		0,2%
haute température (150 à 350°C) :		0,03%
<u>MARÉE</u> :		0,2%



De l'énergie pour tous ?

Énergies non renouvelables : réserves exploitables

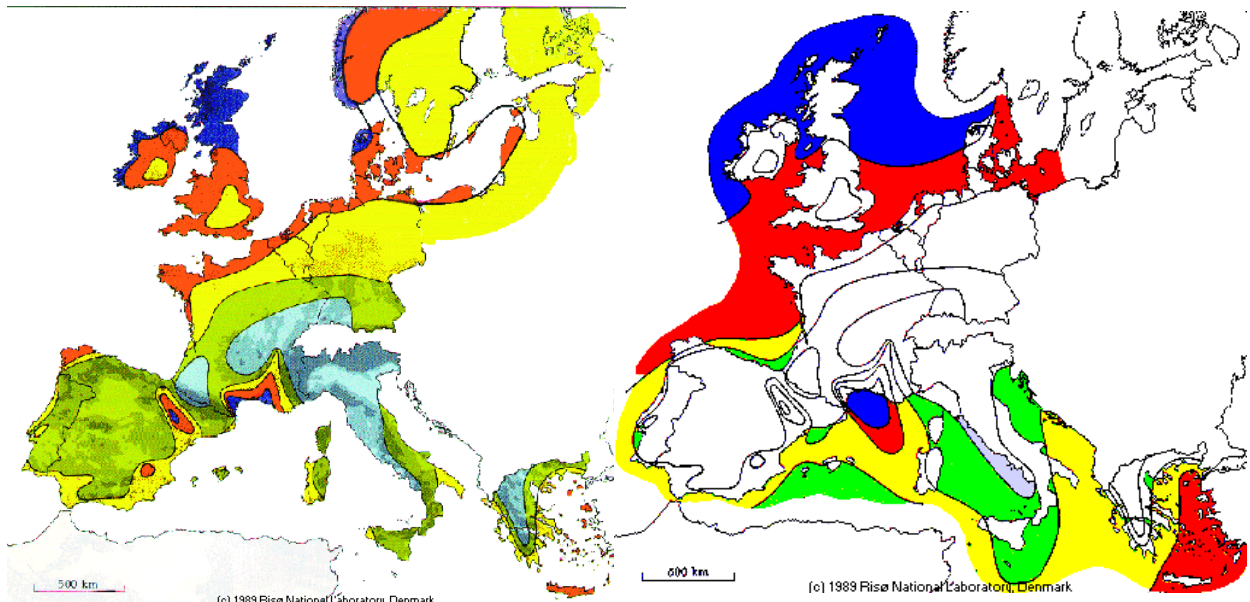
FOSSILES

pétrole :	2.10 ¹⁵ kWh soit 40 ans (ou 15 ans total)
charbon :	8.10 ¹⁵ kWh soit 220 ans (ou 60 ans total)
gaz naturel :	1,2.10 ¹⁵ kWh soit 60 ans (9 ans total)

NUCLÉAIRE

Fission (U 235):	600.10 ¹² kWh soit 70 ans
Surgénérateurs (U238):	80.10 ¹⁵ kWh
Fusion (deutérium et tritium):	80.10 ¹⁵ à 10 ²¹ kWh

Potentiel éolien en Europe

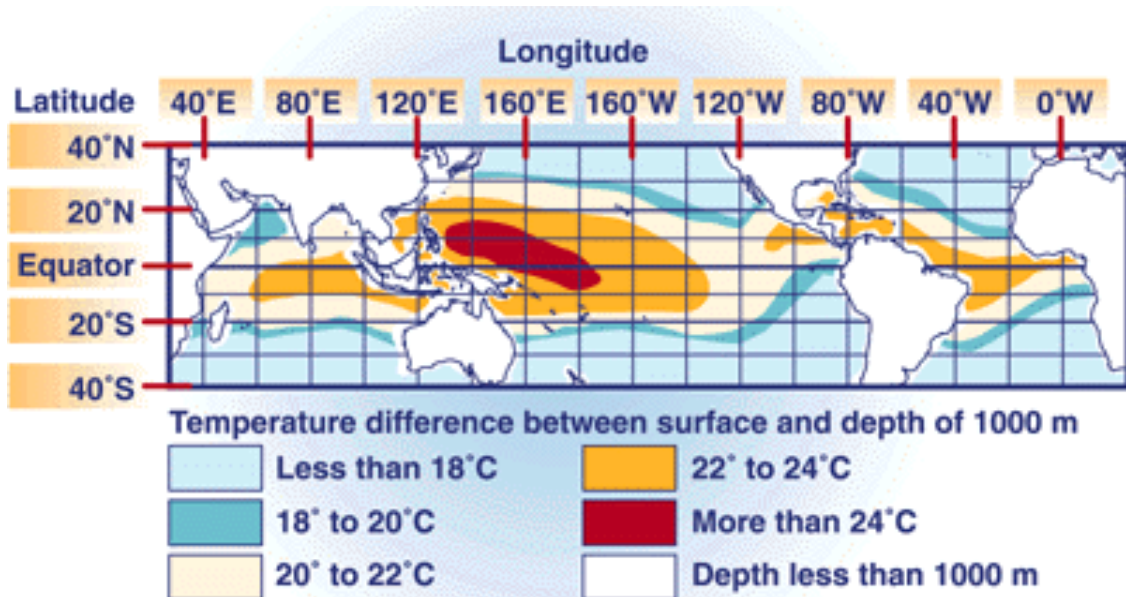


on-shore

off-shore



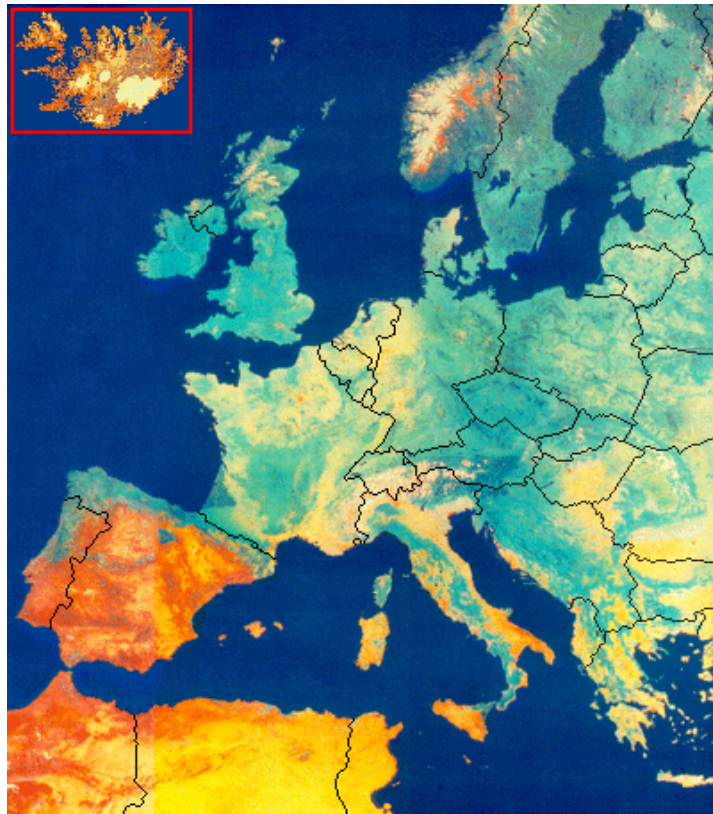
Energie thermique des mers





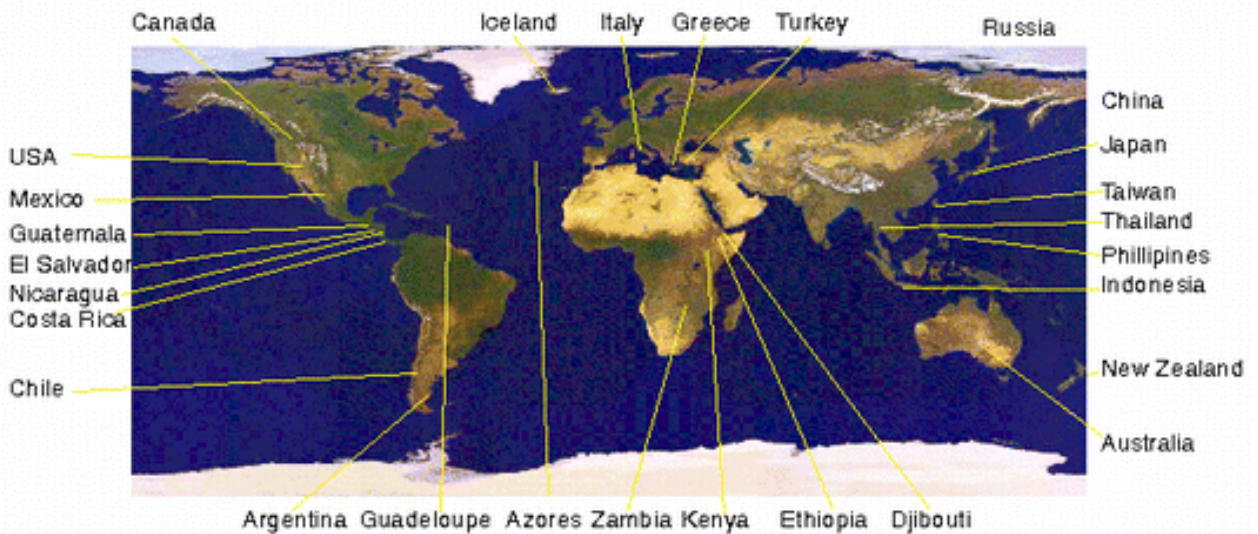
De l'énergie pour tous ?

Ressources
Géothermiques
en Europe



De l'énergie pour tous ?

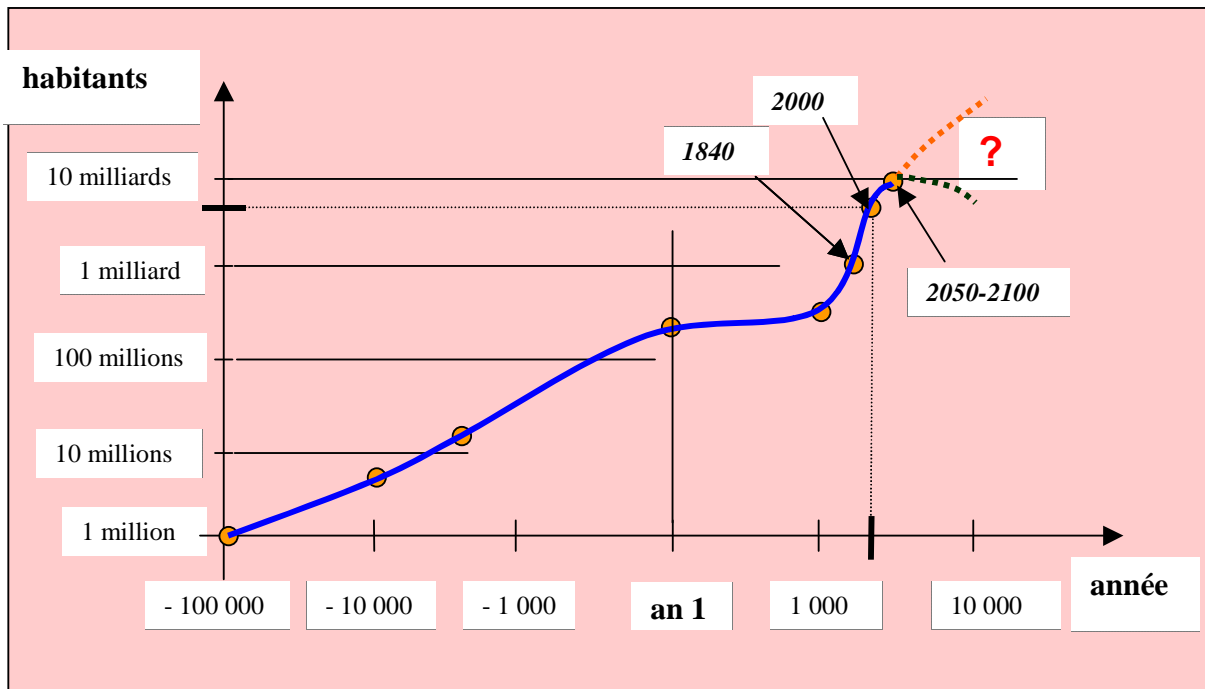
Location of Geothermal Power Sites



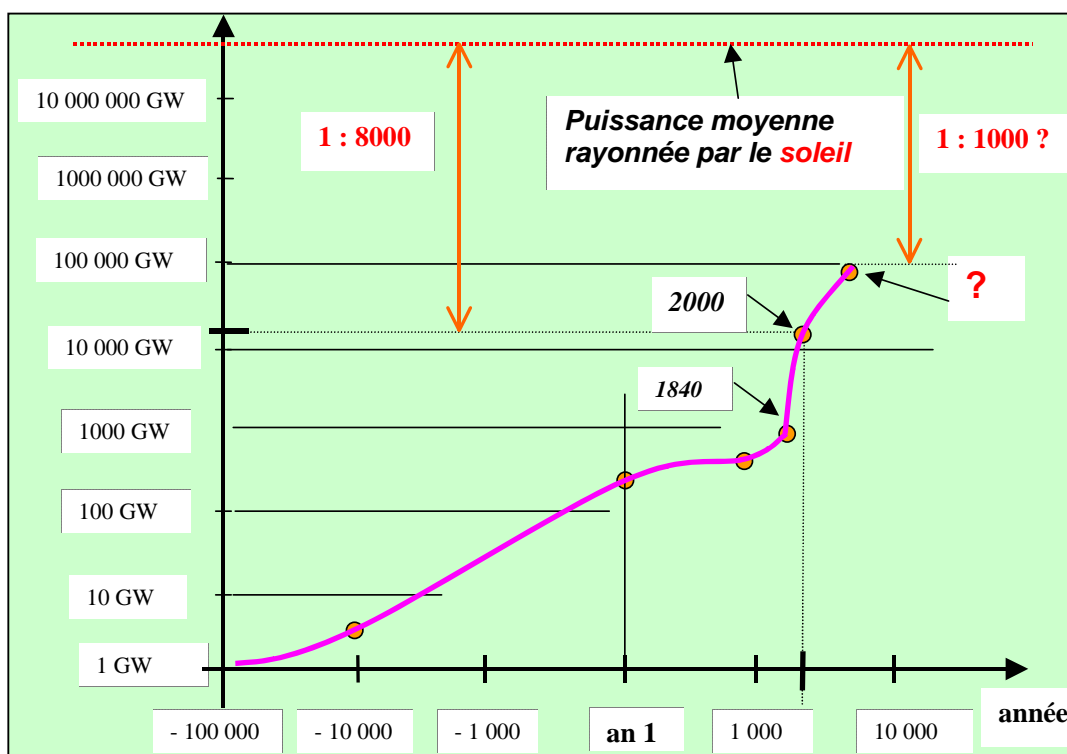
'Clickable' Map Project *click on country names*



Croissance de la population humaine



Puissance moyenne de l'activité énergétique humaine

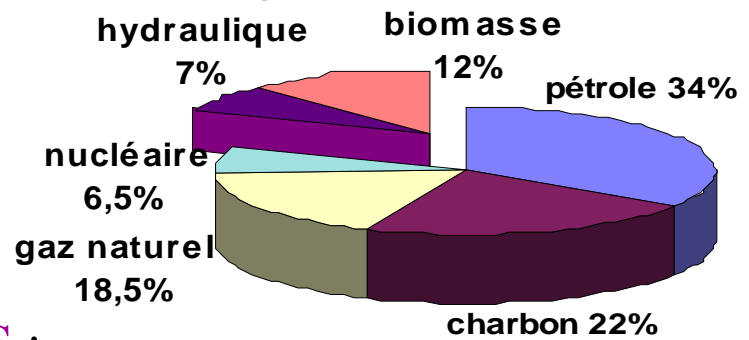




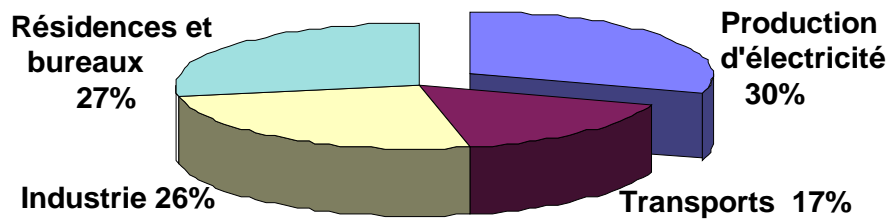
De l'énergie pour tous ?

Consommation humaine d'énergie : **130.10^{12} kWh**

SOURCES :



CONSOMMATEURS :



De l'énergie pour tous ?

Consommation française d'énergie primaire :

$2,9.10^{12}$ kWh

Résidentiel-tertiaire :	45,8 %
Industrie :	27,7%
Transports :	24,9% (95% de pétrole)
Agriculture :	1,7%

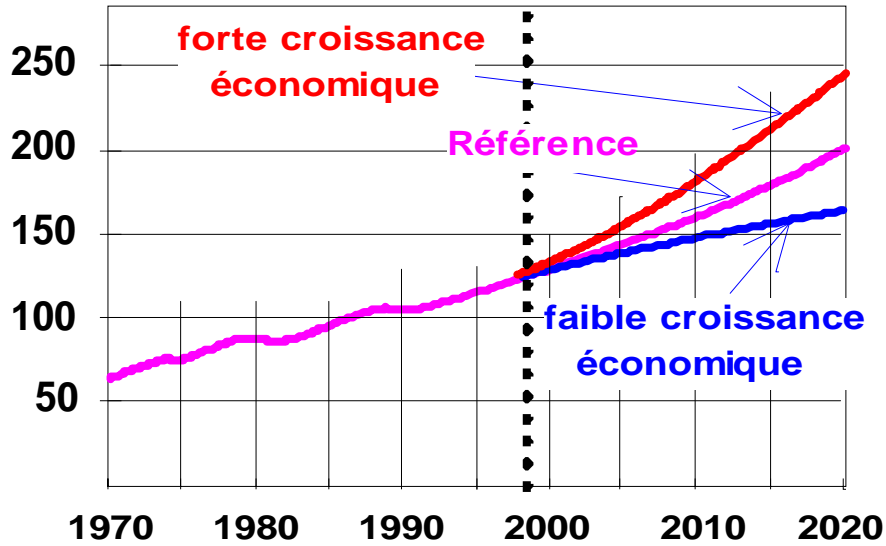




De l'énergie pour tous ?

Croissance de la consommation

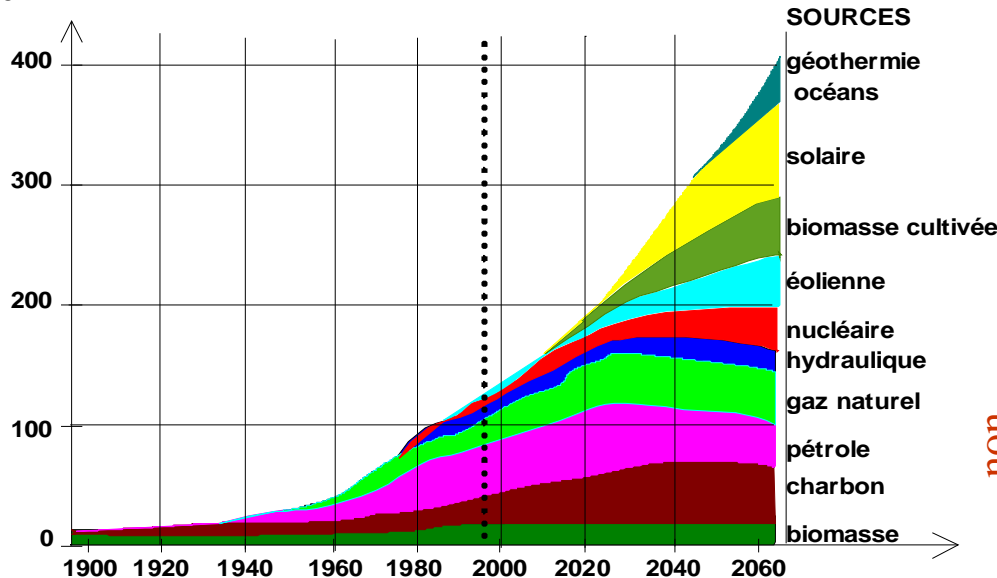
10^{12} kW.h



De l'énergie pour tous ?

Prévision d'évolution des sources

10^{12} kW.h



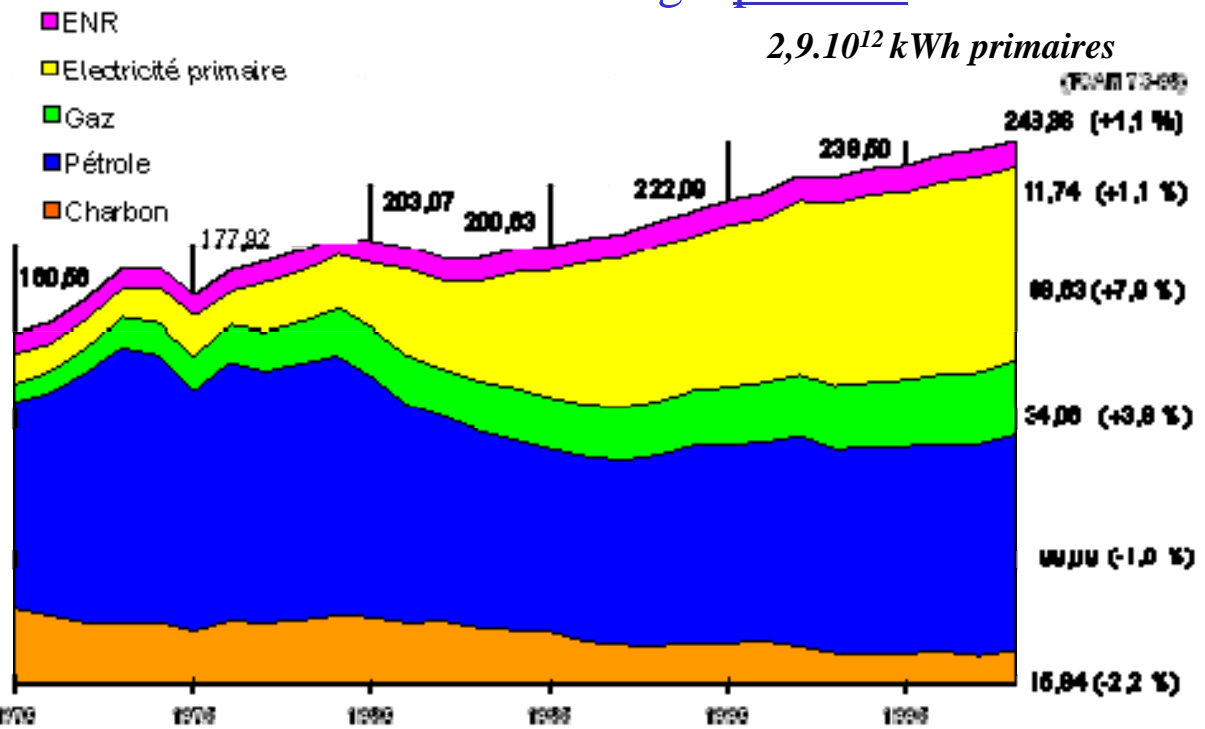
non renouvelables renouvelables





De l'énergie pour tous ?

Consommation d'énergie primaire en France



source : DIGEC



De l'énergie pour tous ?

Consommation globale d'énergie ramenée par habitant et par jour

consommation par habitant par jour	USA	Canada	Chine	Japon	Espagne	France	Norvège	Tunisie	Monde
% de la consom. Mondiale	20%	2,1%	9%	4,3%	0,9%	2,2%	0,2%	0,05%	100%
% de la population	4,6%	0,58%	21,6%	2,1%	0,66%	1%	0,07%	0,16%	
kW.h primaires	250	350	23	115	80	120	160	22	59
kW.h électriques globaux	37	50	3	21	11	20	70	2	6,9
kW.h électriques domestiques	12	17	?	5,3	3,4	6,2	24	0,8	?



De l'énergie pour tous ?

Part de l'électricité-énergie dans la consommation

hors énergie électrique produite dans les systèmes embarqués.

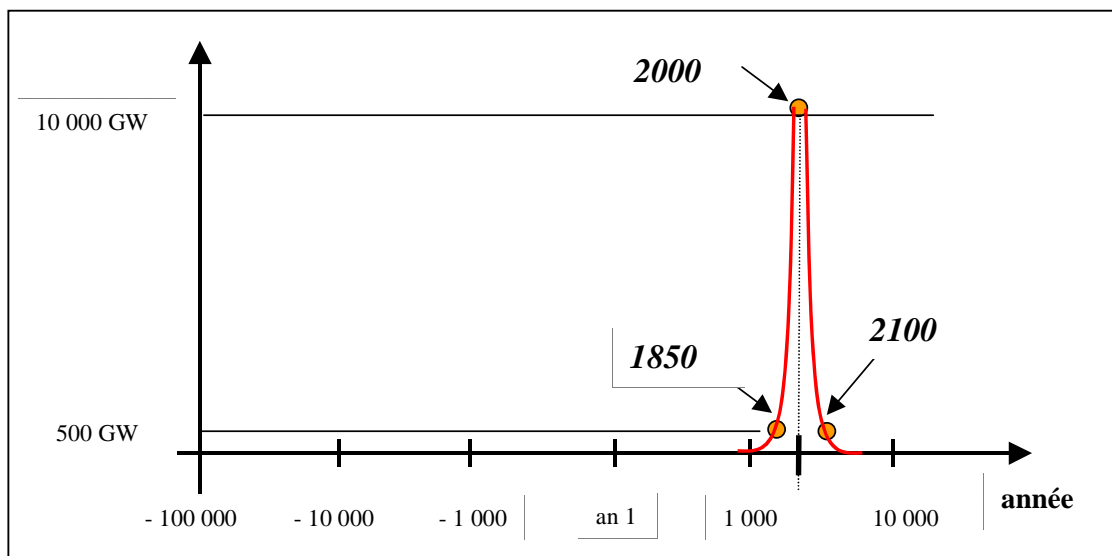
10 ¹² kW.h	Énergie primaire	Énergie électrique	% électricité
1940	20	0,5	2,5%
1960	40	2	5%
1980	80	7	8,7%
1999	130	15	12%
France 99	2,7	0,41	15,2%

Pour une part de 12% d'énergie finale, la production d'électricité consomme 30% de l'énergie primaire mondiale.



De l'énergie pour tous ?

La consommation des combustibles fossiles :



« une allumette dans les ténèbres de l'éternité »

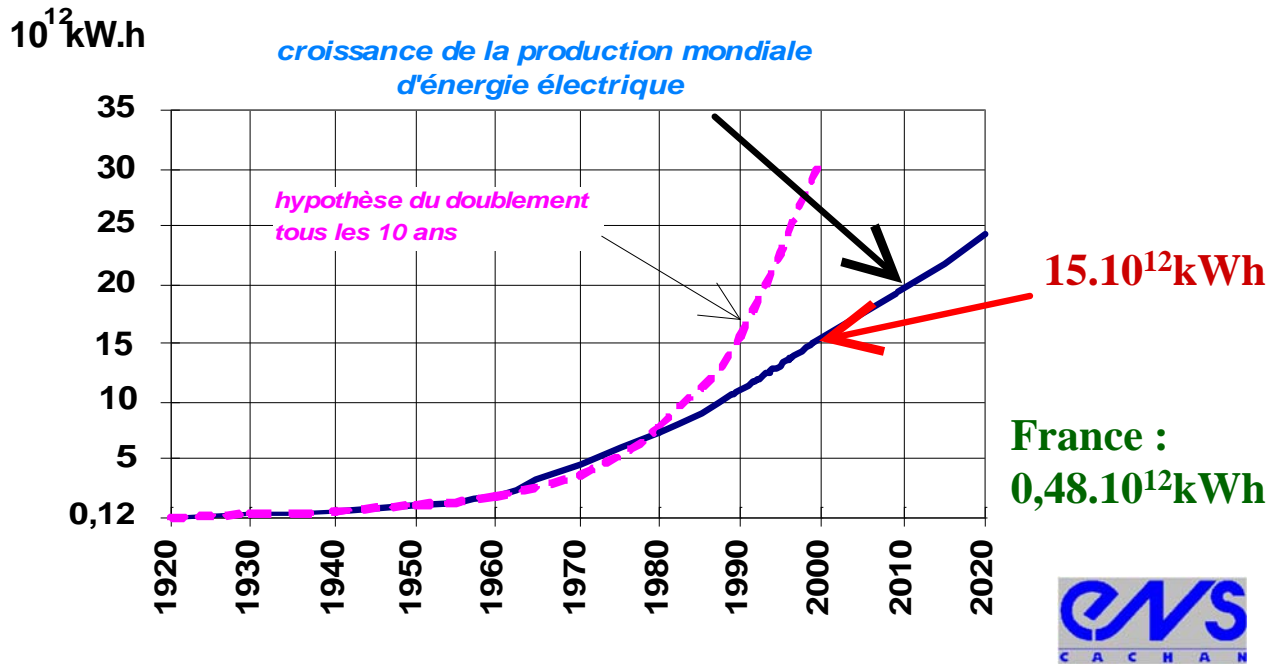
Peter Creola ESA 1996





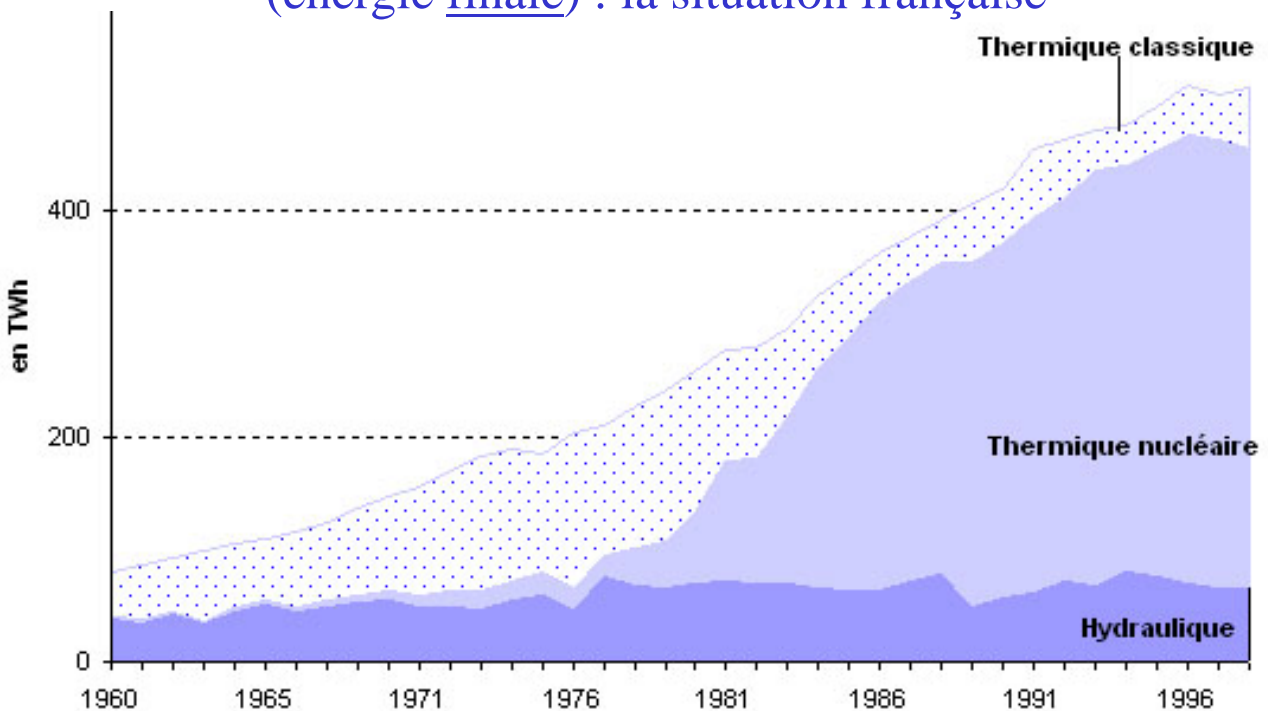
De l'énergie pour tous ?

L'énergie électrique : croissance de la production



De l'énergie pour tous ?

Production d'électricité (énergie finale) : la situation française

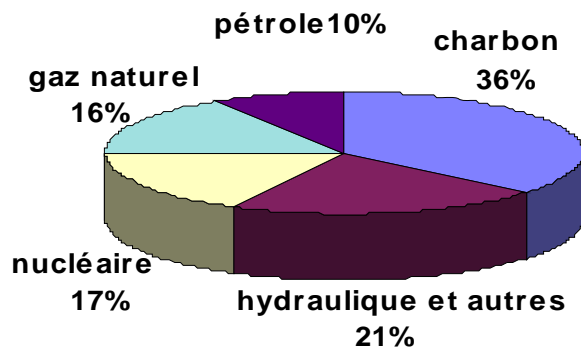




De l'énergie pour tous ?

L'énergie électrique : sources primaires

Monde : $40. 10^{12}$ kWh
(3200 GW)

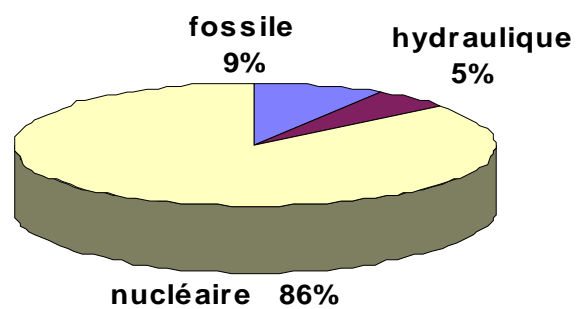
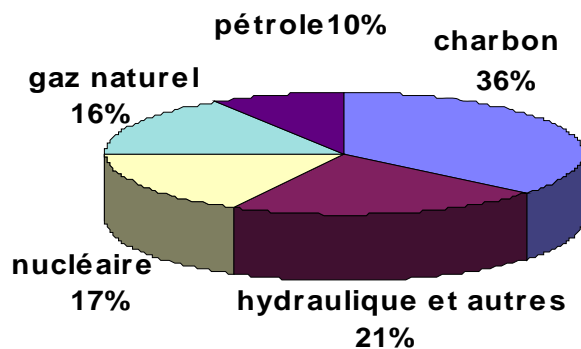


De l'énergie pour tous ?

L'énergie électrique : sources primaires

Monde : $40. 10^{12}$ kWh
(3200 GW)

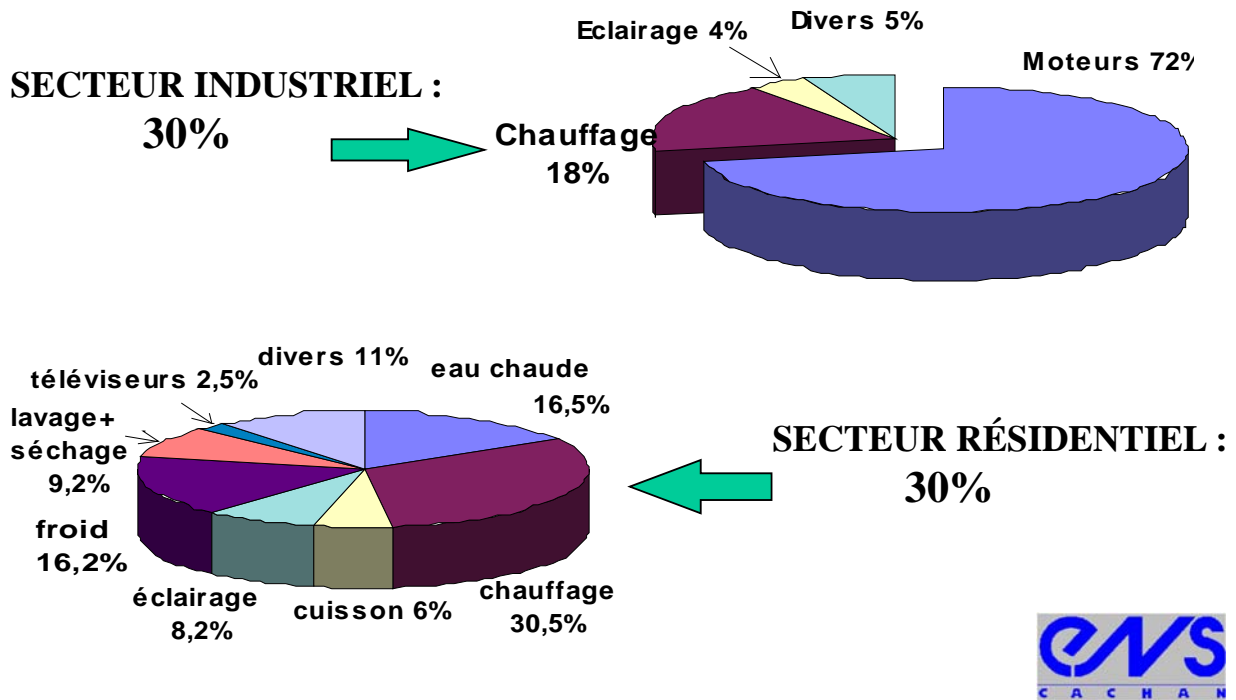
France : $1,4. 10^{12}$ kWh
(110 GW)





De l'énergie pour tous ?

Consommation d'électricité en France

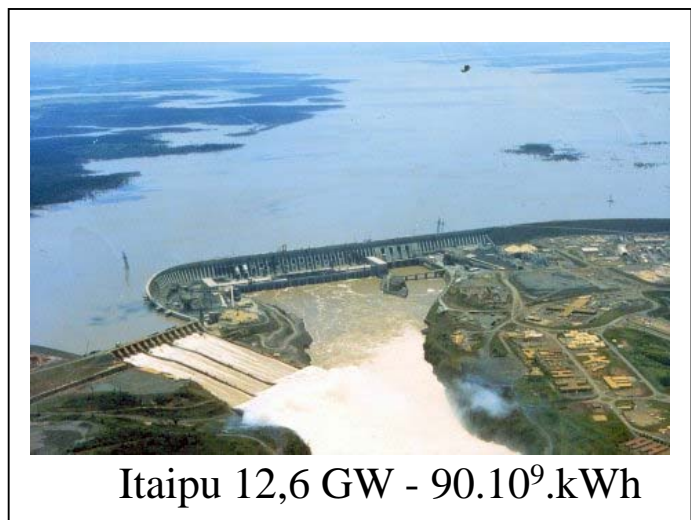


De l'énergie pour tous ?

Production d'électricité par les énergies renouvelables

L'hydraulique :

- le potentiel le plus facile à exploiter :
740 GW installés - $2,7 \cdot 10^{12}$ kWh
- de très loin, la source renouvelable la plus utilisée
- production centralisée et décentralisée
- stockage d'énergie aisé :
pompage - turbinage





De l'énergie pour tous ?

L'hydraulique :

- taux d'exploitation
proche de la saturation
dans les pays industrialisés
(*potentiel de 260 GW au Brésil*)

- très forte progression
dans les pays à économie
émergente

- exemple en construction (2009)
Chine barrage des 3 gorges 18 GW
(27 X 700 MW) : 84.10^9 kWh/an

Conséquences :

- 1000 km² d'eau
- déplacement d'environ
1 million de personnes
- plus de 10 villes englouties
- forte action sur l'écosystème



De l'énergie pour tous ?

La « micro-hydroélectricité » :

définition en France : $P < 2$ MW
potentiel de 4000 chutes aménageables pour 8.10^9 kWh

un potentiel encore peu exploité
très intéressant pour la décentralisation de la production
peu perturbateur pour l'environnement





De l'énergie pour tous ?

Production d'électricité par les énergies renouvelables

Le thermique solaire :



Exemples

- en France :
THEMIS 1,8 MWe
arrêtée, pas rentable
- aux USA :
Solar Two 10 MWe



De l'énergie pour tous ?

Production d'électricité par les énergies renouvelables

Solaire photovoltaïque :

- très fort potentiel
mais encore très coûteux
- surtout en production
décentralisée
- exemple de
production centralisée:
Italie Serre : 3,3 MW
32 000 m² de modules



usine de 500 kW en Californie





De l'énergie pour tous ?

Production d'électricité par les énergies renouvelables

Le vent :

- environ 10 GW déjà installés,
20.10⁹kWh produits
- très fort potentiel encore peu
exploité, surtout en off-shore
- intéressant en production décentralisée
- programme français Eole 2005:
250 à 500 MW à l'horizon 2005
*déjà 200 MW retenus en projets
en 2001 : 7,5 MW au large de Dunkerque*

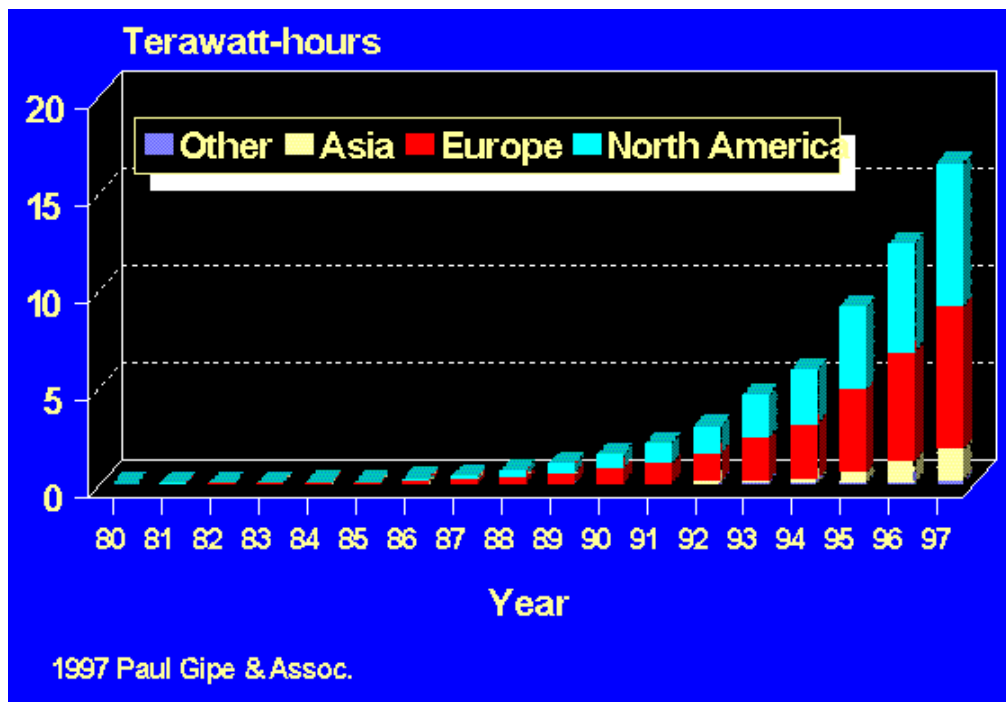


exemple off-shore
Danemark 11 x 450kW



De l'énergie pour tous ?

Evolution de la production éolienne d'électricité
27.10⁹ kWh en 1999 (0,18% de la production mondiale)

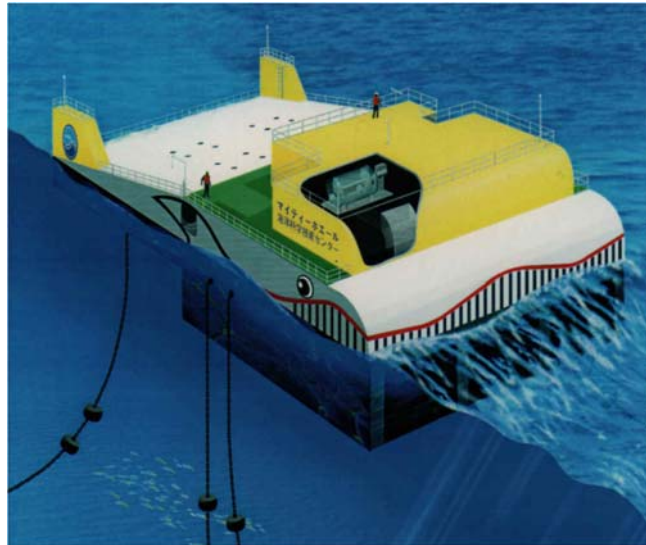




De l'énergie pour tous ?

La houle :

- du « vent concentré »
- attractif pour la production décentralisée
- envisagé pour une production centralisée
- exemple japonais
dispositif 110 kW - 120 MWh annuels



De l'énergie pour tous ?

Géothermie haute température :

- une énergie bon marché pour des sites privilégiés
Temp. d'eau 150 à 350°C
- 8 GW installés
- exemples
japonais : Hatchobaru 300 MW
français : Bouillante 5 MW -> 20MW

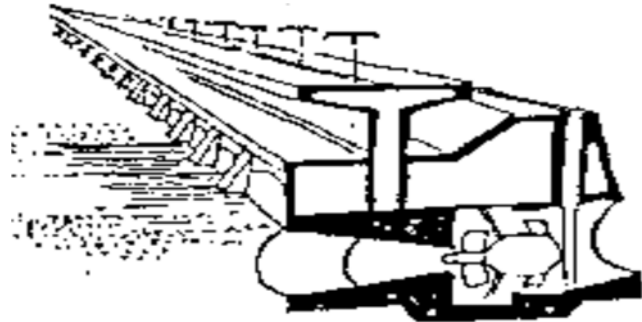




De l'énergie pour tous ?

Energie des marées :

- peu de sites favorables
- exemple français
La Rance : 240 MW
(24 groupes de 10 MW)
très rentable
- autre site potentiel : Severn UK
8640 MW



De l'énergie pour tous ?

Amélioration du bilan énergétique grâce à la COGÉNÉRATION

Production thermique-électrique à partir des combustibles :

- fossiles
- nucléaires
- biomasse
- déchets ménagers
- hydrogène

Moyens

- diesel + alternateur
- turbine à gaz + alternateur
- **pile à combustible**

Proportions de la génération
globale d'électricité :

France : 3%
Allemagne : 11%
Danemark : 30%





De l'énergie pour tous ?

Comparaison des modes de production centralisée

Moyen	Energie annuelle	Puissance installé	kW.h annuels par W installé	Taux d'utilisation	Coût du kW.h
Ensemble	13 000 TW.h	3000 GW	4,3	0,49	
Thermique fossile	8000 TW.h	2000 GW	4	0,44	
Thermique nucléaire	2200 TW.h	360 GW	6,1	0,69	0,21 F (DIGEC)
Hydraulique	2500 TW.h	670 GW	3,7	0,42	
Solaire photo. (Serre)	4,6 GW.h	3,3MW	1,4	0,15	0,4 à 0,8 F ↘ sur 20 ans
Eolien	19 TW.h	9,5 GW	2	0,22	0,3 à 0,4 F ↘
Houle Proto Jamstec	120 MW.h	110	1,1	0,12	?
Géothermie	50 TW.h	8 GW	6	0,68	?
Marée (Rance)	0,54 TW.h	240 MW	2,2	0,25	0,18 F



De l'énergie pour tous ?

Réponse à la question posée :

PAS DE RISQUE DE PÉNURIE D' ÉNERGIE,
les solutions sont nombreuses.

MAIS :

- la production d'énergie est **l'activité humaine qui menace le plus l'environnement**
- il faut rechercher à **minimiser ses conséquences** à long terme
- le **coût** doit être **acceptable**
- il faut préparer dès maintenant les **évolutions**



De l'énergie pour tous ?

Les conséquences des activités énergétiques

- les **rejets gazeux** de combustion des produits carbonés
- les **modifications du climat** : les énergies renouvelables à grande échelle ne sont pas exemptes de danger
- les **déchets nucléaires**
- le **recyclage** des systèmes de production en fin de vie
- la **chaleur dégagée** par les activités énergétiques



De l'énergie pour tous ?

Chaque Français rejette en un an environ :

- **5 m³ d'eaux usées domestiques** et globalement près de 700 m³ tous usages confondus
- **2 tonnes de CO₂**
- **500 kg de déchets ménagers**
- **2,5 tonnes de déchets industriels** dont 5% sont toxiques
- **0,5 m³ de déchets radioactifs**

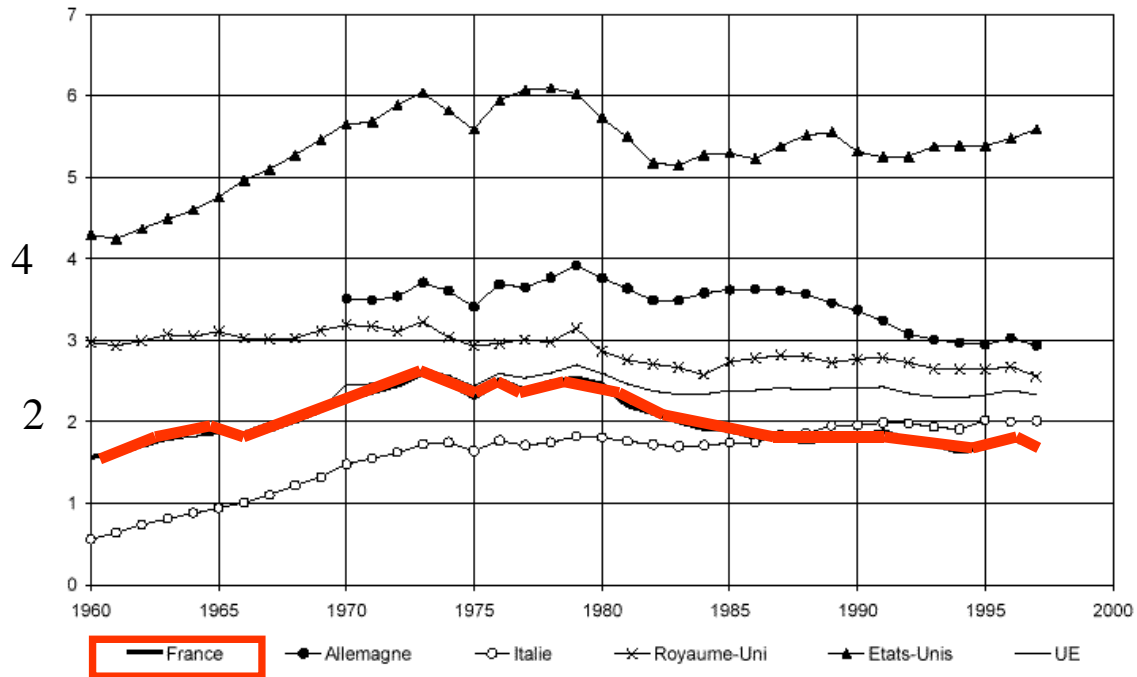
Imaginons leur traitement à côté de notre habitation...





De l'énergie pour tous ?

Emissions de CO2 en tonnes/hab/an



Source : Observatoire de l'énergie, d'après l'AIE (1999).

environ 2 tonnes/hab



De l'énergie pour tous ?

IL FAUT UNE ANALYSE TRÈS GLOBALE POUR BIEN ÉVALUER LES CONSÉQUENCES :

AVANT

- bilan des déchets et du coût énergétique de fabrication

PENDANT

- conséquences de la production

APRÈS

- recyclage



De l'énergie pour tous ?

Pour tous ?

Les **pays en voie de développement** sont
en **très forte croissance** énergétique

Par **soucis d'économie**, ils **se préoccupent peu**
de la pollution

Les pays industrialisés, qui leur vendent les outils de
production, portent la responsabilité...



De l'énergie pour tous ?

L'IDÉAL :

Produire l'énergie

- à partir de sources renouvelables (rayonnement solaire, eau, vent, biomasse...)
- sur le lieu de consommation

De ce point de vue,
la production photovoltaïque dans l'espace
ou la fusion nucléaire
ne sont pas des bonnes solutions.





De l'énergie pour tous ?

LA RÉALITÉ ET LES IMPÉRATIFS :

Dans les **pays industrialisés** :

Impératifs économiques

Renouvellement de l'outil de production lent

Conservation du niveau de vie et de confort

Amélioration de la qualité de vie (air, eau, bruit, vue...)

Création d'emplois

Dans les **pays en voie de développement** :

Accès à une énergie bon marché pour améliorer
niveau de vie et qualité de vie



De l'énergie pour tous ?

UNE SOLUTION :

Evoluer très progressivement vers une utilisation
généralisée des énergies renouvelables

Conserver le nucléaire comme source continue de base
avec une très grande sûreté et
des solutions pour les déchets

Ne plus gaspiller l'énergie

Veiller à maintenir un bilan énergétique
acceptable pour la planète



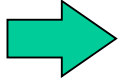


De l'énergie pour tous ?

MIEUX PRODUIRE L'ÉLECTRICITÉ

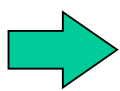
Production combinée chaleur - électricité

Énergies renouvelables



Interconnexion des productions centralisées
et décentralisées + stockage

MIEUX LA CONSOMMER



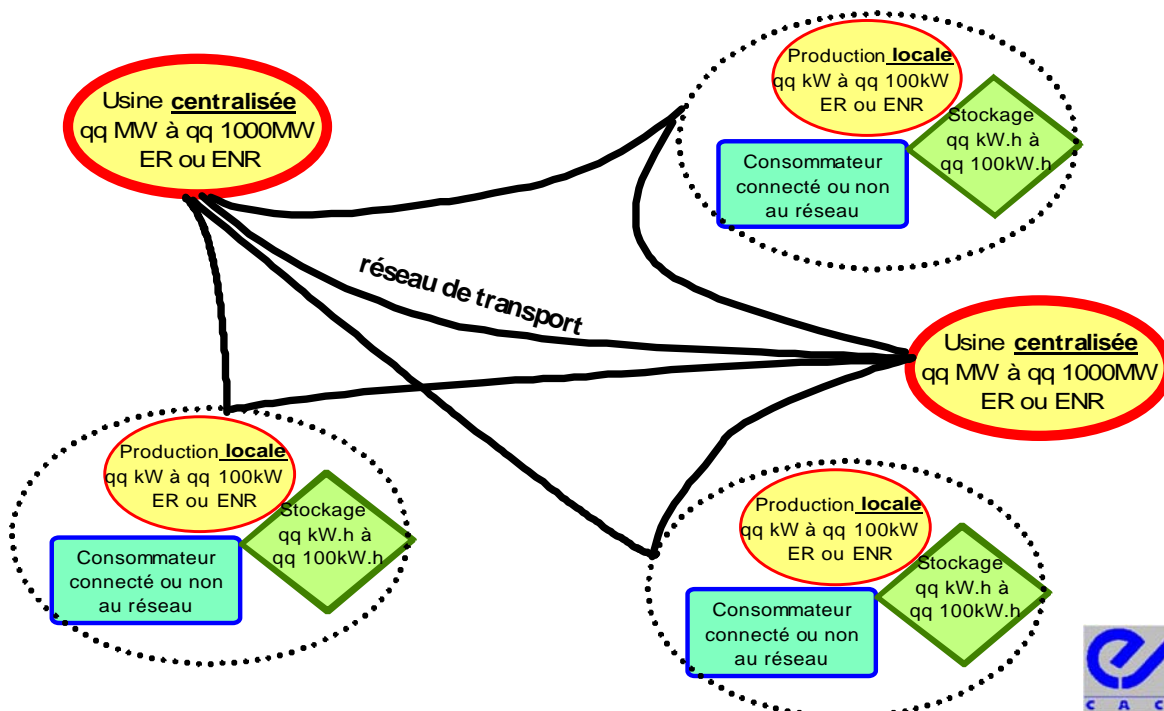
Économies d'énergie

Utilisation directe de la chaleur



De l'énergie pour tous ?

UN GRAND RÉSEAU ÉLECTRIQUE :





De l'énergie pour tous ?

RÉDUCTION DU GASPILLAGE ÉNERGÉTIQUE

Chauffage :

ISOLATION
PAS D'ÉLECTRICITÉ MAL PRODUITE

Électricité :

AMÉLIORATION DES PROCESS DE CONVERSION
ÉVOLUTION DES HABITUDES

Potentiels d'économies en France, exemples :

5.10⁹kWh variation électronique de vitesse dans l'industrie
26.10⁹kWh sur les appareils ménagers
5.10⁹kWh sur les «veilles»



De l'énergie pour tous ?

Conséquences de l'ouverture du marché de l'électricité
en France dans un premier temps,
pour les consommateurs de plus de 100.10⁶kWh

- baisse des coûts de l'électricité
- plus grande difficulté de faire émerger
de nouvelles sources
- risque important d'une baisse de
qualité de l'énergie électrique
(gestion du réseau plus délicate)



Investissements dans le programme électronucléaire français 1000 milliards de francs

En estimant à $5000 \cdot 10^9$ kWh, l'énergie nucléaire produite depuis les années 60, cela donne :

20 centimes/kWh d'investissements publics

En estimant à $12\,000 \cdot 10^9$ kWh, l'énergie nucléaire que l'on produira jusqu'en 2020, cela donne :

8 centimes/kWh d'investissements publics

Retraitement et stockage des déchets :
environ 100 milliards de francs en 96
30 centimes/kWh

Alors que le coût de production du kWh nucléaire est estimé à
21 centimes/kWh