



Quelles énergies pour 2050 ?

Professeur Jacques Foos

Les challenges de ce siècle

Énergie

Eau douce

Les challenges de ce siècle

Énergie

Indispensable à la vie et au développement économique

L'homme a besoin de 2,7 kWh/j

→ 6% de la consommation totale 2005

En réalité : France → 150 kWh/j

USA → 260 kWh/j

Espérance de vie : France homme : 77,6 ans femme : 84,5 ans

PVD homme : 45 ans femme : 47 ans

Les challenges de ce siècle

Eau douce

Indispensable à la vie et au développement économique

Les besoins augmentent de 64 milliards de m³/an.

**Une seule solution pour l'avenir :
le dessalement de l'eau de mer (5 kWh/m³)**

Par an : 30 EPR ou 65 000 éoliennes de 5 MW

Énergie

Ses usages : **électricité**
 chaleur
 transports

2 unités : **le kilowattheure**

la tonne équivalent pétrole
ou tep (11 628 kWh)

1 mégatep : Mtep = 1 million de tep


1 gigatep : Gtep = 1 milliard de tep


Où en sommes-nous ?

**Dans le Monde, la consommation d'énergie primaire est
passée de 1 à 10 Gtep/an entre 1900 et 2000
(+2,35% par an)**

Évolution de la population

 **300 millions en l'an 0**

 **moins de 1 milliard en 1800**

 **1,65 milliard en 1900**

 **6 milliards en 2000 (+1,48% par an)**

Le 19 décembre 2005

6,5 milliards de Terriens !

6 milliards en octobre 1999 $\Rightarrow \Delta : + 220\ 000$ par jour

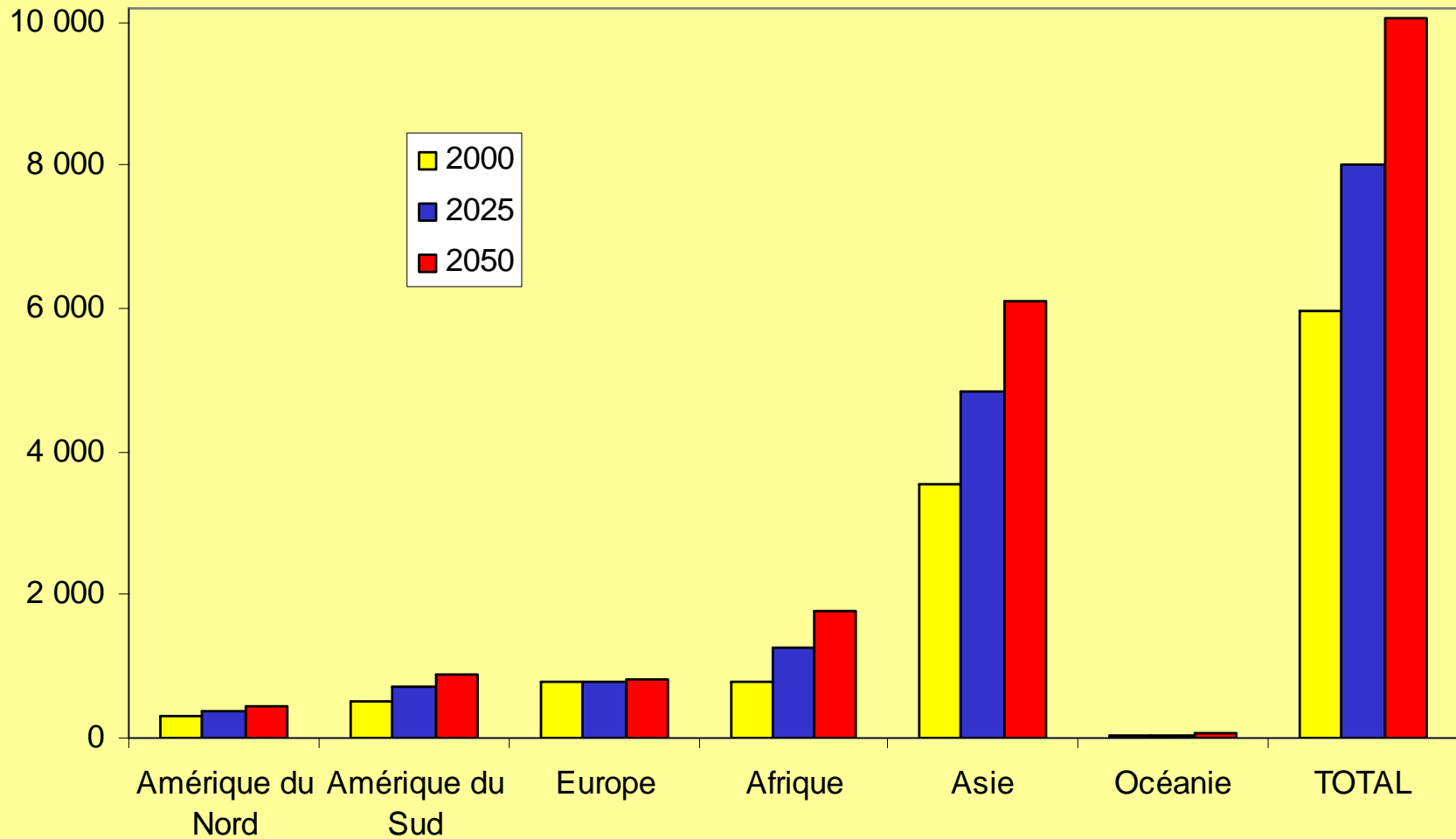
**Fin 2009, le rythme de croissance est toujours le même :
+ 220 000 hab/j**

Chaque jour : 365 000 naissances (plus de 4 par seconde)

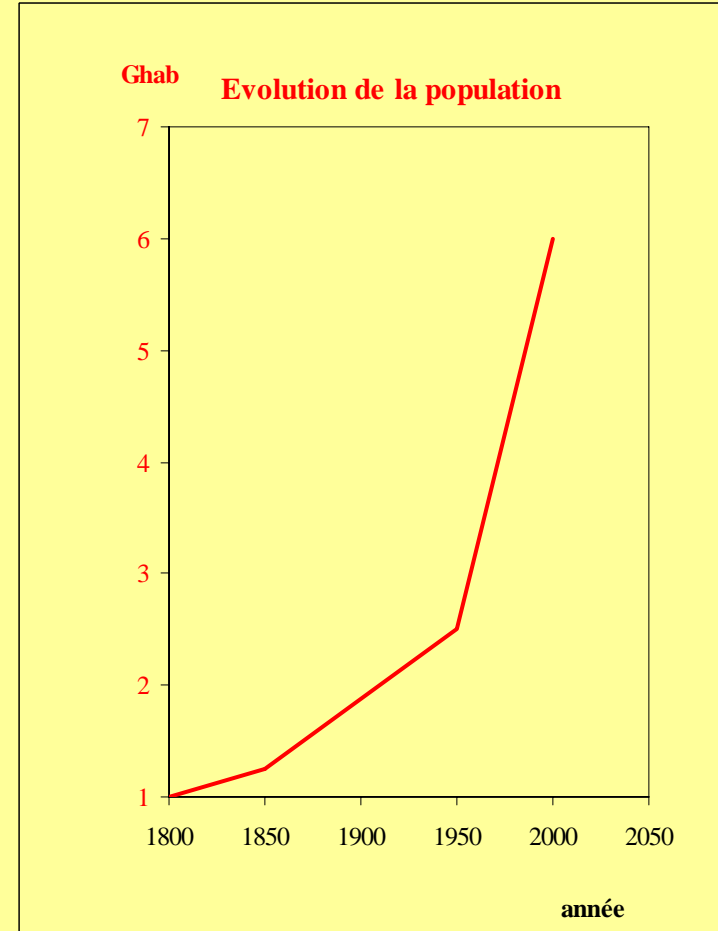
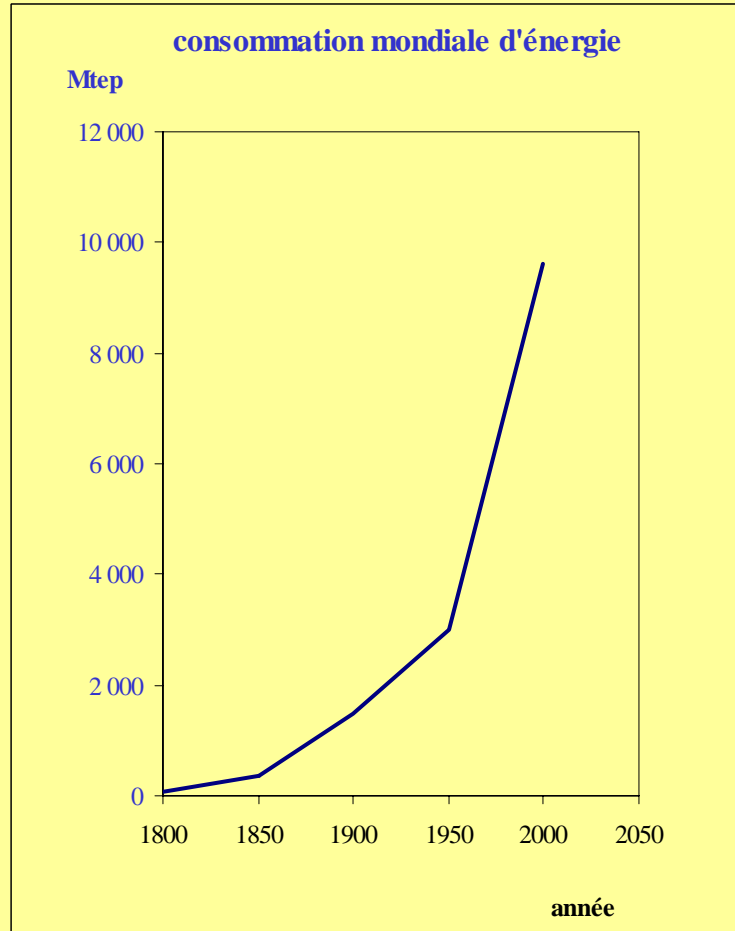
**57% en Asie, 26% en Afrique, 9% en Amérique latine,
5% en Europe, 3% en Amérique du Nord, 0,8% en Océanie**

\Rightarrow 10 milliards de Terriens en 2050

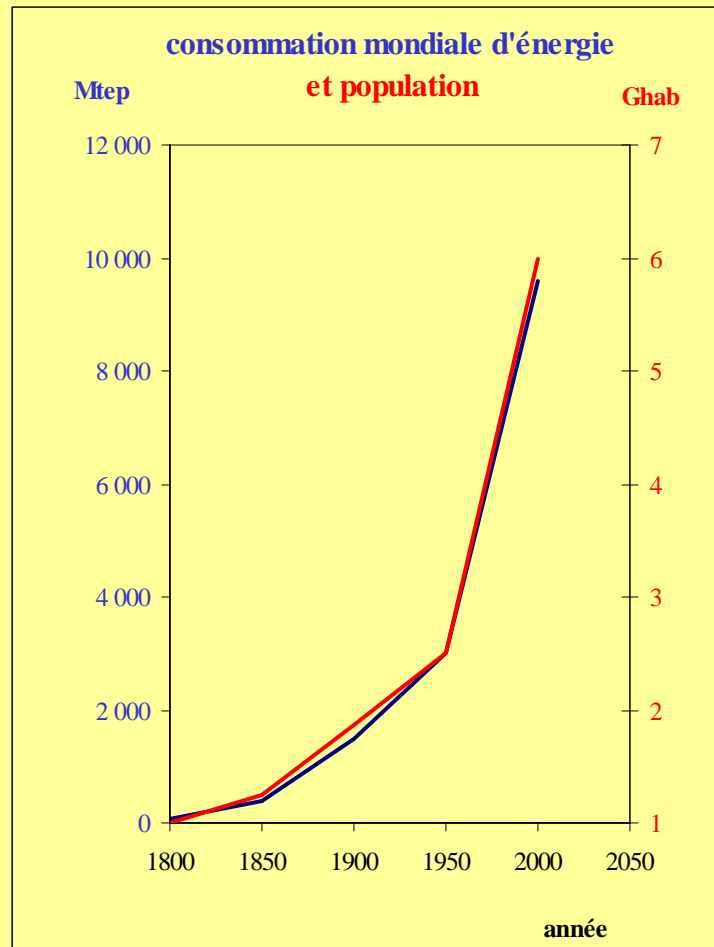
Évolution de la population mondiale → 2050



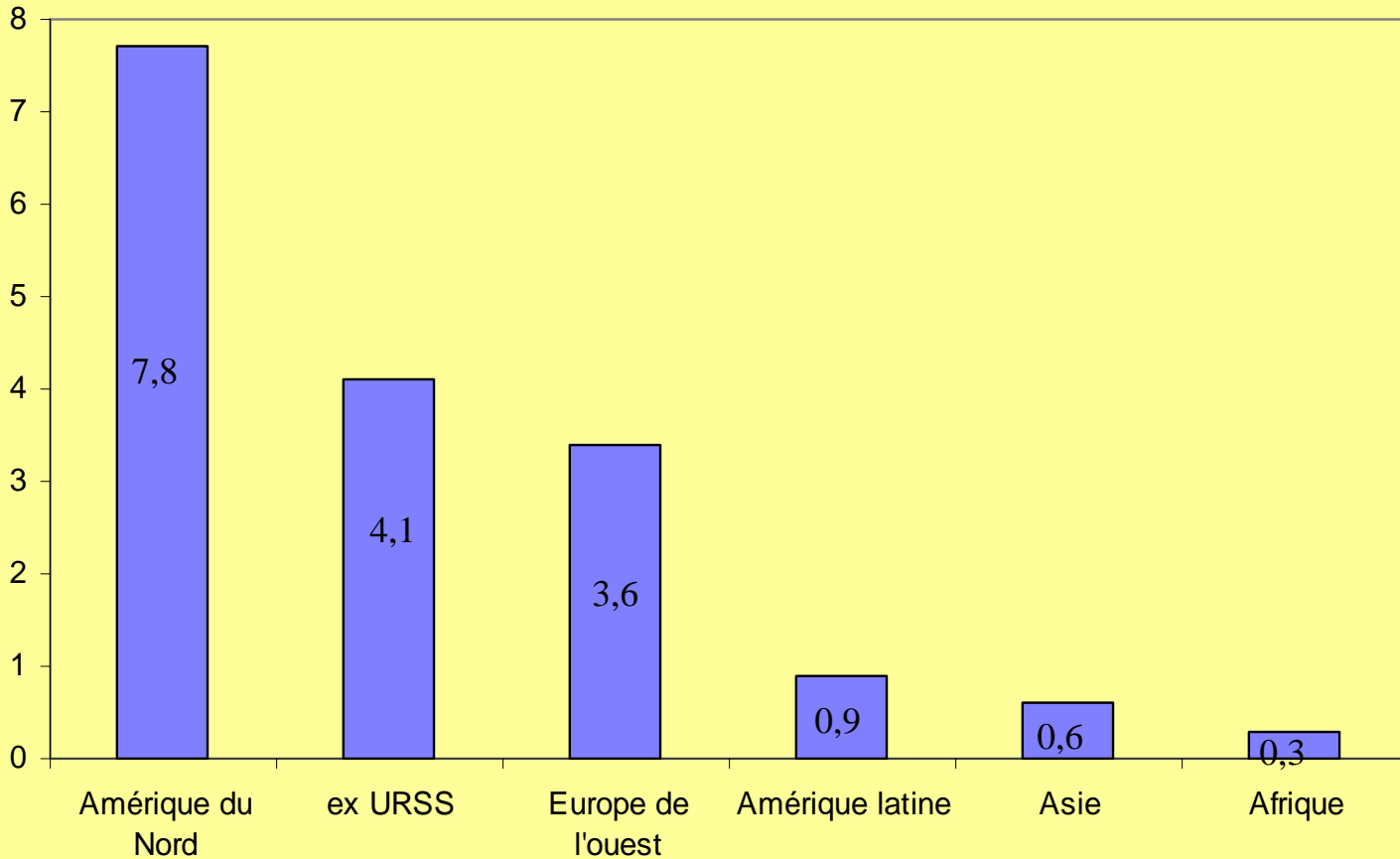
Consommation d'énergie / population



Consommation d'énergie / population

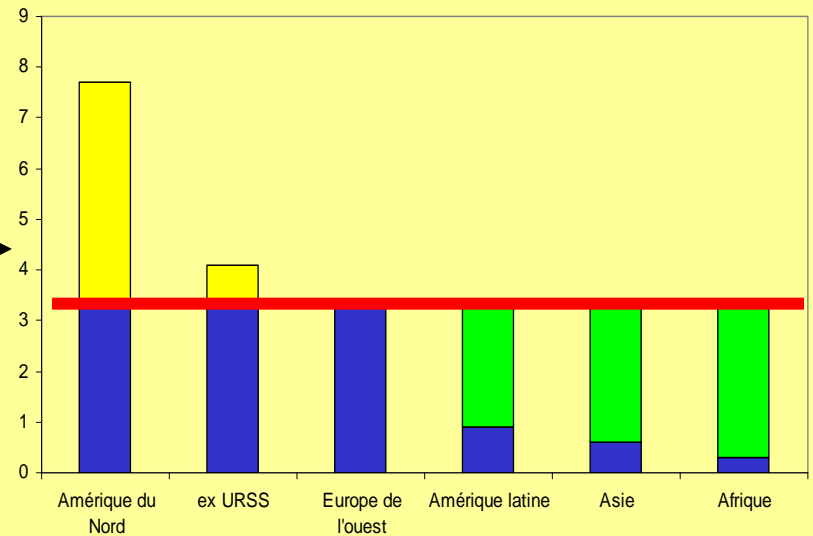
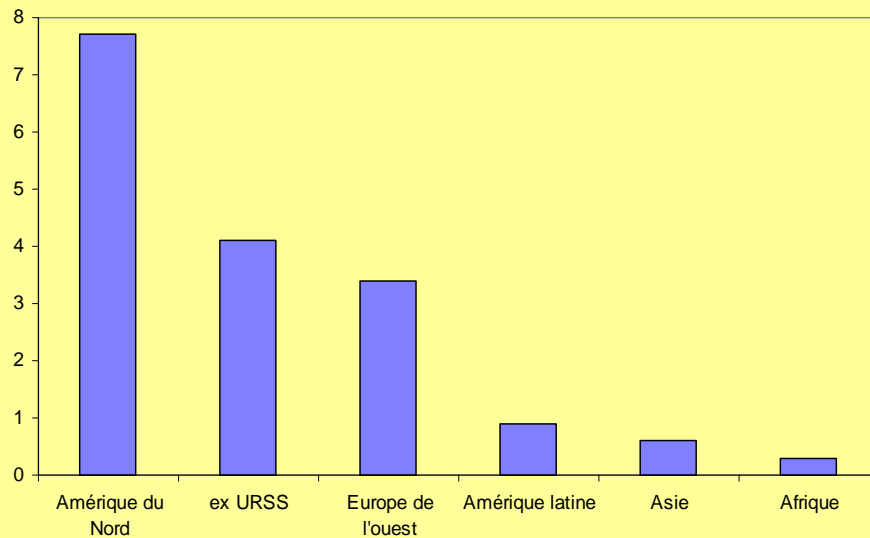


Consommation d'énergie commerciale (tep/hab)



Quelques scénarios de 2000 à 2050

1) Économie d'énergie dans les pays développés et croissance dans les pays en voie de développement → niveau Europe



Quelques scénarios de 2000 à 2050

- 1) **Économie d'énergie dans les pays développés et croissance dans les pays en voie de développement → niveau Europe**
- 2) **Maintien d'une croissance à 2,35%/an dans les pays développés.
Croissance plus forte dans certains pays en forte voie de développement**
- 3) **+ 2,35%/an pour tous les pays. (soit 32,5 Gtep par an en 2050) ce qui nécessite un effort considérable sur les économies d'énergie**

Évolution de la consommation en Mtep/an

	2000	2025	2050	2025	2050
Am. Nord	2 880	1 656	1 935	5 147	9 200
Am. Sud	590	2 809	3 556	1 573	4 193
Europe	2 965	3 570	3 638	5 300	9 472
Afrique	308	5 794	8 079	821	2 189
Asie	3 260	22 905	28 951	17 693	31 622
Océanie	178	229	295	318	570
	10 181	36 963	46 454	30 852	57 246

Scénarios (suite)

Hypothèse 1 : On passe de 10,2 à **46,4 Gtep/an**

Hypothèse 2 : On passe de 10,2 à **57,2 Gtep/an**

Hypothèse 3 : On passe de 10,2 à **32,5 Gtep/an**

Entre la plus **minimaliste** et la plus **réaliste**, augmentation du simple ($\Delta = 22,3$ Gtep/an) à plus du double (**47 Gtep/an**)

Le Δ a été de 9 en 100 ans, il sera compris entre 20 et 50 Gtep/an d'ici 2050 !

32,5 Gtep

46,4 Gtep

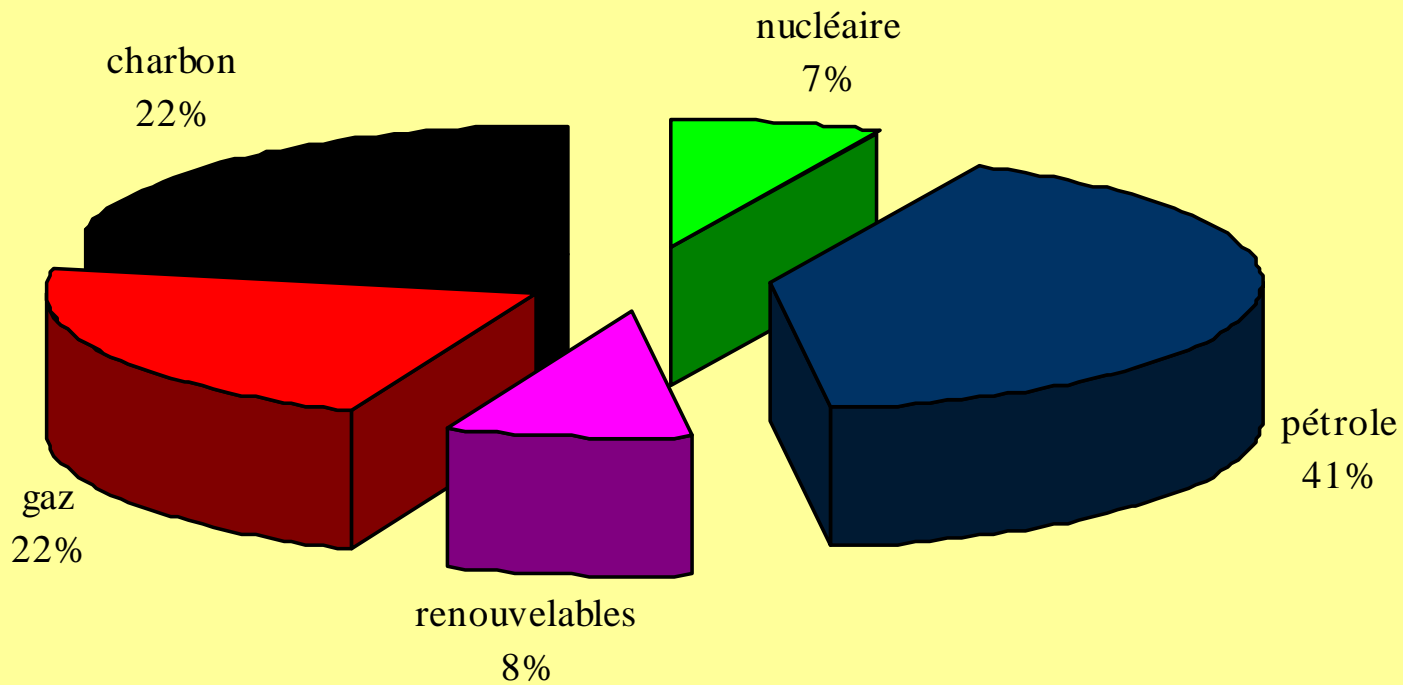
57,2 Gtep

Les sources d'énergie

- * eau → énergie hydraulique
- * soleil → énergie solaire (thermique, photovoltaïque)
- * courants → énergie hydrolienne
- * vent → énergie éolienne
- * marée → énergie marémotrice
- * biomasse → houille verte, déchets
- * géothermie → forages
- * vapeur → charbon, pétrole, gaz
nucléaire (fission, fusion)

(* énergie musculaire)

Les sources d'énergie : bilan 2005



Sources d'énergie → quelle utilisation ?

- **chaleur** (combustibles fossiles, **géothermie**, **soleil**, biomasse)
- **électricité** (**eau**, combustibles fossiles, **solaire**, courants, **éolien**, **marée**, **nucléaire**)
- **transport** (combustibles fossiles, **vent**, **musculaire**)

Combustibles fossiles : état des réserves (2005)

- Charbon :** 1 140 milliards de tonnes **760 Gtep**
(houille + lignite) *400 ans de réserves au rythme actuel*
- Gaz :** 217 000 milliards de mètres cube **179 Gtep**
60 ans de réserves au rythme actuel
- Pétrole :** 163 milliards de tonnes (123 : OPEP) **163 Gtep**
35 ans de réserves au rythme actuel
- Importations chinoises de pétrole : 23 Mtep (1996) → 148 Mtep en 2006**
(l'Arabie Saoudite a multiplié par 100 ses exportations de pétrole vers la Chine en 10 ans).

*Quand les « bébés 2000 » souffleront leurs 40
bougies, il n'y aura plus de pétrole !*

*Quand ils prendront leur retraite (?) il n'y aura
plus de gaz !*

Combustibles fossiles : réserves ultimes

Pétrole non conventionnel

Schistes bitumineux et sables asphaltiques

plusieurs centaines de Gtep

Mais coûteux en énergie et très polluant à exploiter

*(ex : au Canada, 1 centrale nucléaire + une raffinerie
prévues pour l'exploitation de ce pétrole)*

Deux évènements importants ont marqué la fin du second millénaire

* Développement durable

« *Sustainable development* » rapport Brundtland – 1987

« Répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs »

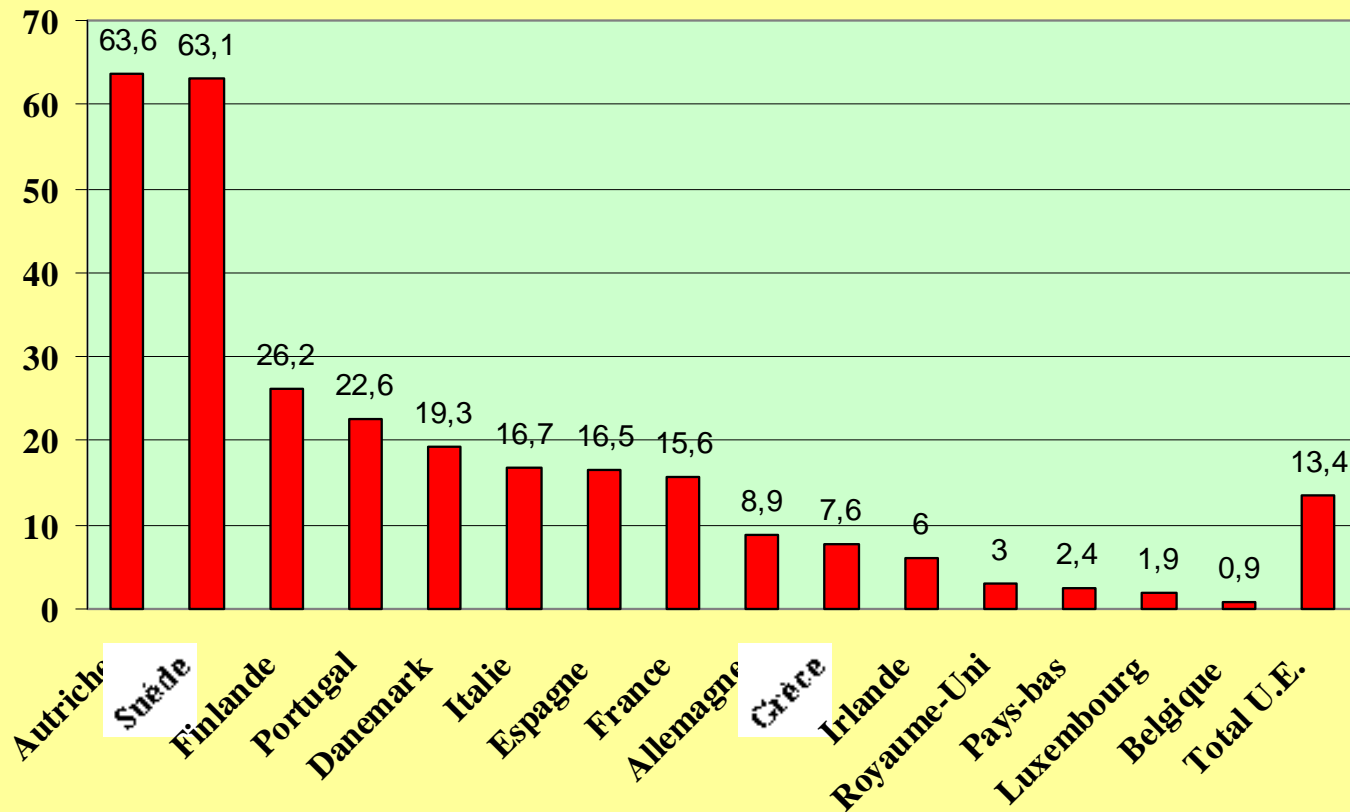
« Nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants »

Antoine de Saint-Exupéry
(1900-1944)

Développement Durable

Situation de l'Europe en 2002

Part des énergies renouvelables / consommation d'énergie primaire

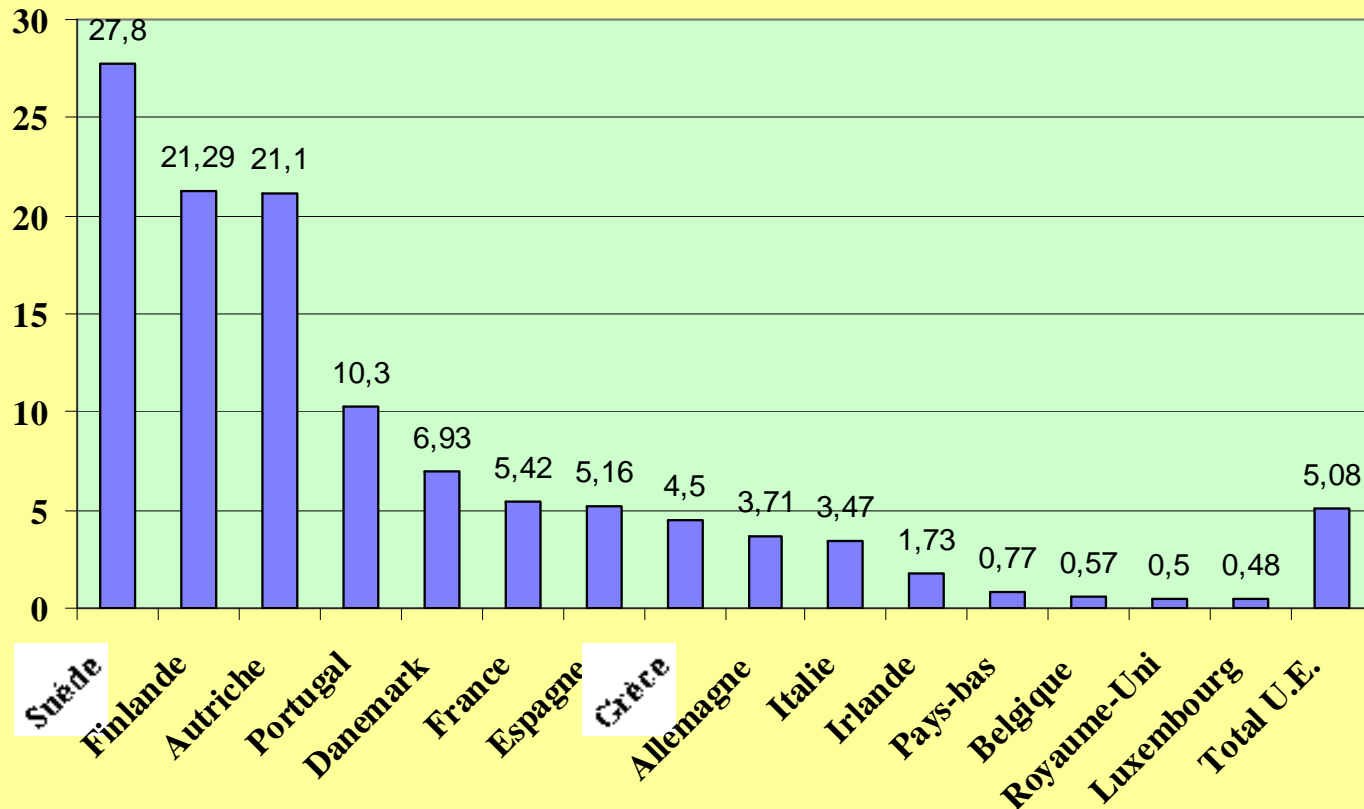


Source :
Observ'ER2004

Développement Durable

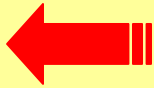
Situation de l'Europe en 2002

Part des énergies renouvelables / consommation d'électricité



Source :
Observ'ER2004

Consommation de pétrole

Pays	Augmentation en 20 ans
Corée du Sud	306%
Inde	240%
Chine	192%
Brésil	88%
Canada	23%
USA	16%
Japon	12%
France	-12% 

Deux évènements importants ont marqué la fin du second millénaire

*** Développement durable**

*** Protocole de Kyoto**

Le protocole de Kyoto

Les pays dits « de l'annexe 1 » (Europe des 25, Russie, USA, Australie, Biélorussie, Canada, Japon, Suisse, N^{elle} Zélande, Turquie, Ukraine) s'engagent à une réduction globale de 5% des émissions des GES entre 2008 et 2012.

159 pays

décembre 1997

Mise en œuvre si 55% des pays représentant 55% du volume total des émissions de CO₂ en 1990 signent le protocole. Les pays en voie de développement ne sont pas concernés.

Évolution des émissions de CO₂ 1971 - 1990

Amérique du Nord	+ 17%	<i>dont USA</i>	+ 13%
Amérique latine	+ 67%		
Europe des 15	+ 5%	<i>dont France</i>	- 17%
Ex URSS	+ 50%		
Moyen Orient	+ 360%		
Afrique	+ 146%		
Asie	+ 181%	<i>dont Chine</i>	+ 176%
		<i>Inde</i>	+ 196%
Japon, Corée du Sud,	+ 17%		
Australie, N^{elle} Zélande			
Autres pays	+ 35%		
<hr/>			
<i>Monde</i>	<i>+ 44%</i>		

Évolution des émissions de CO₂ 1990 - 2002

	Réalisé %	Objectif de réduction entre 1990 et 2002 %
États - Unis	+ 16,7	- 7
Europe des 15	+ 3	- 8
Russie	- 25,3	0
Chine	+ 44,5	-
Japon	+ 18,9	- 6
Monde	+ 16,4	-

Protocole de Kyoto

	tonnes de CO ₂ /hab en 2008
USA	19
Australie	15
Canada	14,5
Allemagne	12
Belgique	11
UK	10
Japon	9
Italie	7
Espagne, Suisse	6,5
Chine	6
France	5

Électricité et CO₂

Émissions en CO₂ des différentes filières de production d'électricité

Modes de production	Hydraulique	nucléaire	éolien	photovoltaïque	cycle combiné à gaz	Gaz naturel	fuel
Émissions totales de CO ₂ /kWh (en grammes)	4	6	3 à 22 (380)	60 à 150 (400)	430	880	890

Source : EDF

Émissions en CO₂ pour 1 kWh moyen annuel dans différentes régions du monde

Production 1996	UE	USA	Japon	OCDE	monde	France
Émissions totales de CO ₂ /kWh (en grammes)	472	638	536	543	539	63

Source : AIE 1996

Bilan énergétique 2050

Énergie éolienne

La France au 3^e rang européen en 2006 (6^e en 2005 ; 810 MW installés en 2006)

Énergie intermittente : le développement de l'énergie éolienne passe obligatoirement par le stockage de l'énergie !

Production d'énergie en 2000 : 0,01 Gtep/an

32,5 Gtep

46,4 Gtep

57,2 Gtep

Off-shore ou on-shore ?

Malgré un coût plus élevé :

- **1500 euros par kW installé pour l'off-shore**
- **1000 euros par kW installé pour l'on-shore**

la tendance, dans les pays à forte densité de population comme la France, va plutôt vers l'off-shore

en raison de

L'énergie éolienne

- * nuisance sonore
- * nuisance visuelle (de 120 m à 180 m de haut)
- * parfois dangereuse
- * toujours mortelle pour les oiseaux
- * emprise au sol élevée : 6 ha/ éolienne
ou 80 ha par MW fourni car rendement faible *et donc*
- * **coût de fonctionnement élevé**

EDF achète le « kWh éolien » 8,4 c€ pendant 5 ans puis 7,2 c€ pendant 15 ans.

Par comparaison, le kWh électrique fin 2008 est vendu par EDF : 3 c€

Ainsi, les 2450 MW installés en France rapporteront 350 millions d'euros aux constructeurs de machines et plus de 30 millions d'euros aux régions, tous payés par le contribuable.

En 2015, la facture pourrait se situer entre 1 et 2,5 milliards d'euros

L'énergie éolienne

Greenpeace - France (septembre 2009, Presse de la Manche) :

« 2 000 éoliennes peuvent remplacer un réacteur EPR »

Exact : 2 000 éoliennes de 5 MW fournissent la même puissance électrique qu'un réacteur EPR (1 600 MW) pour un coût de 10 milliards d'euros (on-shore) ou 15 milliards d'euros (off-shore)

Bilan énergétique 2050

Énergie éolienne

La France au 3^e rang européen en 2006 (6^e en 2005 ; 810 MW installés en 2006)

Énergie intermittente : le développement de l'énergie éolienne passe obligatoirement par le stockage de l'énergie !

Production d'énergie en 2000 : 0,01 Gtep/an

32,5 Gtep

46,4 Gtep

57,2 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie éolienne

La France au 3^e rang européen en 2006 (6^e en 2005 ; 810 MW installés en 2006)

Énergie intermittente : le développement de l'énergie éolienne passe obligatoirement par le stockage de l'énergie !

Production d'énergie en 2000 : 0,01 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 3 Gtep/an

29,5 Gtep

43,4 Gtep

54,2 Gtep

3 Gtep de production éolienne ?

Ce sont 6 millions d'éoliennes de 5 MW (1 pour 1000 Terriens, des mâts de 150 à 180 mètres de haut, des pales de 70 à 90 mètres)

Ainsi, rien que pour Paris intra-muros, ce sont 2150 éoliennes de cette envergure, soit plus de 100 par arrondissement

Surface mondiale occupée : 10 fois celle de la France ; pour un coût de 57 000 milliards d'euros soit 1,4 fois le PIB mondial annuel

Bilan énergétique 2050

Énergie hydraulique

* **coût de production élevé** : 1 à 8 c€/par kWh selon la taille de l'installation

* **Emprise au sol élevée** : 30 ha / MW

*Ex : barrage des 3 gorges : 1 200 000 personnes déplacées,
20 villes et 1 000 villages engloutis*

29,5 Gtep

43,4 Gtep

54,2 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie hydraulique

* **Ruptures dramatiques** : 15 000 morts en Inde en 1979

2 600 morts en Italie en 1963

En France, à Malpasset : 423 morts le 2 décembre 1959 à 21h13

Production d'énergie en 2000 : 0,23 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 1,5 Gtep/an

28 Gtep

41,9 Gtep

52,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie solaire

- * Conversion thermique : **chauffage solaire, chauffe-eau solaire**
- * Conversion thermodynamique : **four solaire, centrales thermosolaires**
prix du kWh : 2 € en 2007
- * Conversion photovoltaïque : *Coût du kWh élevé pour le réseau (10 fois le prix moyen) mais rentable en autonome dans les Pays en voie de développement*

Production d'énergie en 2000 : **0,01 Gtep/an**

Production maximale en 2050 : **3 Gtep/an**

28 Gtep

41,9 Gtep

52,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie solaire

- * Conversion thermique : **chauffage solaire, chauffe-eau solaire**
- * Conversion thermodynamique : **four solaire, centrales thermosolaires**
prix du kWh : 2 € en 2007
- * Conversion photovoltaïque : *Coût du kWh élevé pour le réseau (10 fois le prix moyen) mais rentable en autonome dans les Pays en voie de développement*

Production d'énergie en 2000 : **0,01 Gtep/an**

Production maximale en 2050 : **3 Gtep/an**

25 Gtep

38,9 Gtep

49,7 Gtep

3 Gtep de production solaire ?

Ce sont 41 m² de panneaux solaires par habitant de la Terre pour un coût de 213 000 milliards d'euros soit 5 fois le PIB mondial annuel ou 10% de ce PIB par an pendant 50 ans

Exemple d'une famille française :

Installation de 20 m² de panneaux pour 16 000 euros

(puissance installée : 2 kW ; production annuelle : 2600 kWh).

Les crédits d'impôts et subventions diverses couvrent 70 à 80 % de l'investissement

Le kWh est vendu 55 c€ à EDF mais acheté à 3 c€: L'installation est amortie en 3 ans ¹/₂ et rapporte ensuite un revenu annuel de 1400 à 1500 euros

C'est la Fée Électricité : le compteur tourne à l'envers

La Fée électricité (*suite*)

Deux autres exemples :

ZAC Pajol , Paris : 3 200 m² de panneaux solaires pour une production de 380 000 kWh/an, soit un bénéfice annuel de 200 000 euros dans quelques années pour l'investisseur privé à qui la Ville de Paris a sous-traité.

Les parkings du Supermarché L... à Montpellier couverts de panneaux solaires : production électrique de 3 500 kWh/jour soit un coût annuel pour EDF de 650 000 euros.

Bilan énergétique 2050

Énergie géothermique

La température de la Terre augmente d'un degré pour
30 mètres de profondeur :

→ **Chaleur (pompe à chaleur ...)**

**Réserves quasi inépuisables mais difficilement
exploitables à grande échelle**

≈ 15 GW thermiques installés en 2000 (30 Mtep / an)

→ **Électricité 10 GW installés en 2000 (20 Mtep / an)**

Bilan énergétique 2050

Énergie géothermique

Récupération par pompes à chaleur de l'énergie thermique dissipée par l'industrie (serres, pisciculture, chauffage urbain)

Exemple : récupération de 150 Mtep sur les 660 des centrales nucléaires

Production d'énergie en 2000 : 0,03 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 1 Gtep/an

25 Gtep

38,9 Gtep

49,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie géothermique

Récupération par pompes à chaleur de l'énergie thermique dissipée par l'industrie (serres, pisciculture, chauffage urbain)

Exemple : récupération de 150 Mtep sur les 660 des centrales nucléaires

Production d'énergie en 2000 : 0,03 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 1 Gtep/an

24 Gtep

37,9 Gtep

48,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Biomasse (chaleur)

Environ 1 Gtep en 2000

combustion du bois, paille, ordures ménagères ...

très utilisée malgré un rendement énergétique faible

Responsable de 1 500 morts par jour selon l'OMS (surtout dans les pays en voie de développement)

Bilan énergétique 2050

Biomasse (transport)

→ **biocarburants** **70 Mtep en 2000**

2 filières → huile végétale (colza – tournesol)

→ éthanol (blé - betterave)

Le rendement est obligatoirement faible car il faut produire les végétaux ce qui implique :

- * de mettre du carburant dans le tracteur**
- * de fabriquer des engrais (très énergivore)**
- * de broyer et purifier le produit de la culture**
- * de distiller le produit obtenu pour la filière alcool**

Bilan énergétique 2050

Biomasse (transport)

Si on veut remplacer en France la moitié du pétrole utilisé pour les transports (25 Mtep), il faut une surface minimale immobilisée pour la production végétale égale à :

	tep/km ²	Surface (km ²) nécessaire pour 25 Mtep	% de surface totale cultivable	Pour mémoire surface cultivée (km ²)
Blé	289,50	86 354	47,0%	55 150
colza	270,25	92 508	50,3%	5 020
Tournesol	212,10	117 870	64,2%	8 930
Betterave	337,40	74 094	40,3%	4 785

Rapport DIREM / ADEME - 2003

« Boire ou conduire, il faut choisir »
« Manger ou rouler, il faut trancher »

Manger ou rouler, il faut trancher

Biomasse

Production d'énergie en 2000 : 0,1 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an

24 Gtep

37,9 Gtep

48,7 Gtep

(Manger ou rouler, il faut trancher

Biomasse

Production d'énergie en 2000 : 0,1 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an
(25 fois la surface de la France de terres cultivables)

20 Gtep

33,9 Gtep

44,7 Gtep

L'hydrogène : le carburant de demain

« Je crois que l'eau sera employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène, utilisés isolément ou séparément fourniront une source de chaleur et de lumière inépuisable »

Jules Verne – L'île mystérieuse

Mais : Bien que l'hydrogène soit présent partout, *il n'est disponible nulle part.*
Il n'existe que sous forme combinée à d'autres éléments.

Production de l'hydrogène

- * Par décomposition de l'eau (essentiellement par électrolyse)
- * À partir d'énergies fossiles (méthane, gaz à l'eau, gazéification du charbon)

Il est évident que seule la première voie de production peut être raisonnablement envisagée !

Source de l'énergie d'électrolyse : éolien ou nucléaire.

Coût de production : 10 fois plus que les hydrocarbures.

Coût de stockage : 100 fois celui des hydrocarbures liquides.

Le carburant hydrogène

Option prometteuse mais contraintes nombreuses :

- * même comprimé à 700 bars, il faut 4,6 litres d'hydrogène pour fournir autant d'énergie qu'un litre d'essence.
- * **Caractère inflammable et explosif.**
- * **Fragilisation des matériaux par l'hydrogène**
→ recherche technologique à développer dès aujourd'hui.

Bilan énergétique 2050

Énergie des mers

* Usines marémotrices (amplitude) **25 Mtep en 2000**

Ex. : la Rance 240 MW

* Énergie hydrolienne (énergie des courants)

* Énergie des vagues

Production maximale en 2050 : 1 Gtep/an ?

20 Gtep

33,9 Gtep

44,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie des mers

* Usines marémotrices (amplitude) **25 Mtep en 2000**

Ex. : la Rance 240 MW

* Énergie hydrolienne (énergie des courants)

* Énergie des vagues

Production maximale en 2050 : 1 Gtep/an ?

19 Gtep

32,9 Gtep

43,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Centrales thermiques électrogènes

Une ville d'un million d'habitants utilise 1 GWe

Seul le thermique peut fournir une telle puissance en occupant une surface limitée.

Thermique classique : combustible fossile (gaz, pétrole, charbon)

*Thermique nucléaire : fission : uranium (minerai, eau de mer)
plutonium (issu des centrales)*

fusion : deutérium / tritium

Thermique classique :

Production d'énergie en 2000 : 2,5 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an

19 Gtep

32,9 Gtep

43,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Centrales thermiques électrogènes

Une ville d'un million d'habitants utilise 1 GWe

Seul le thermique peut fournir une telle puissance en occupant une surface limitée.

Thermique classique : combustible fossile (gaz, pétrole, charbon)

*Thermique nucléaire : fission : uranium (minerai, eau de mer)
plutonium (issu des centrales)*

fusion : deutérium / tritium

Thermique classique :

Production d'énergie en 2000 : 2,5 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 4 Gtep/an

15 Gtep

28,9 Gtep

39,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Les combustibles fossiles

* Thermique classique (électricité) : 2,5 Gtep/an

- 2,2 millions de tonnes de poussières
- 56,5 millions de tonnes de dioxyde de soufre
- 30,7 millions de tonnes de dioxyde d'azote
- 10,4 milliards de tonnes de gaz carbonique
(soit 5300 milliards m³)

→ Chine

Bilan énergétique 2050

Les combustibles fossiles

- * Thermique classique (électricité) : 2,5 Gtep/an
- * Autres utilisations (chaleur, transport) : 5,5 Gtep/an

Production d'énergie en 2000 : 5,5 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 8 Gtep/an

15 Gtep

28,9 Gtep

39,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Les combustibles fossiles

- * Thermique classique (électricité) : 2,5 Gtep/an
- * Autres utilisations (chaleur, transport) : 5,5 Gtep/an

Production d'énergie en 2000 : 5,5 Gtep/an

Production maximale en 2050 : 8 Gtep/an

7 Gtep

20,9 Gtep

31,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Énergie musculaire

Animaux de trait 0,2 Mtep en 2000

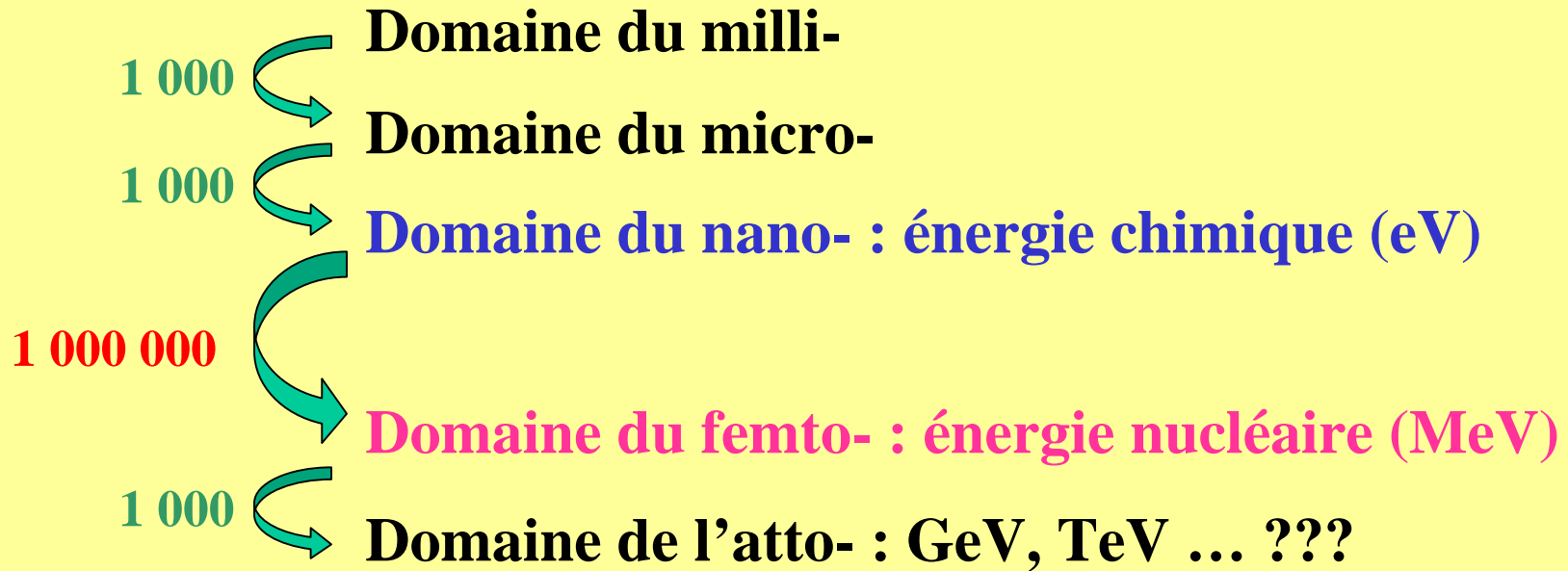
Probablement constant dans l'avenir !

7 Gtep

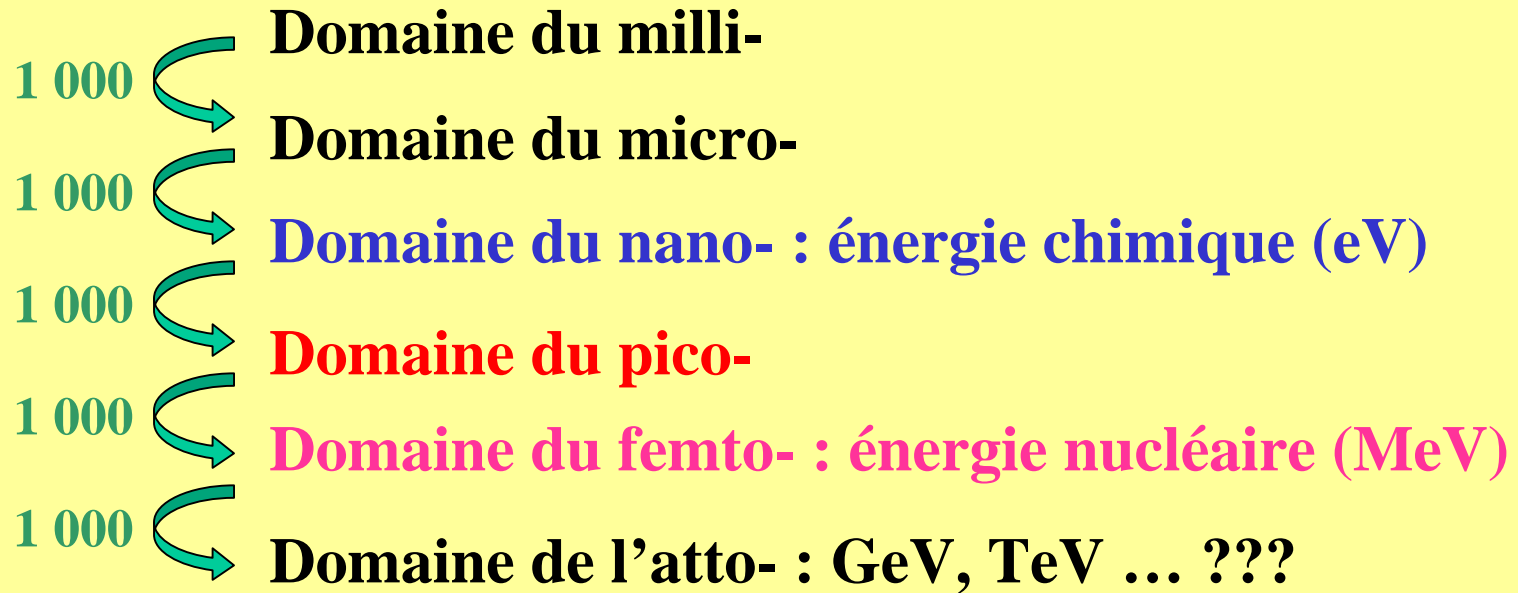
20,9 Gtep

31,7 Gtep

Et les énergies inconnues ?



Et les énergies inconnues ?



Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie

- * Des matériaux isolants pour l'habitat et une politique volontariste d'aménagement,
- * Une amélioration du rendement de tout moteur,
- * Un changement individuel d'habitudes de vie, sans contraintes réelles,
- * Une recherche poussée sur le stockage de l'énergie,
- * Des subventions utilisées de façon intelligente.

⇒ - 1,5 Gtep dans l'hypothèse la plus optimiste

7 Gtep

20,9 Gtep

31,7 Gtep

Bilan énergétique 2050

Économies d'énergie

- * Des matériaux isolants pour l'habitat et une politique volontariste d'aménagement,
- * Une amélioration du rendement de tout moteur,
- * Un changement individuel d'habitudes de vie, sans contraintes réelles,
- * Une recherche poussée sur le stockage de l'énergie,
- * Des subventions utilisées de façon intelligente.

⇒ - 1,5 Gtep dans l'hypothèse la plus optimiste

5,5 Gtep

19,4 Gtep

30,2 Gtep

Bilan énergétique 2050

5,5 Gtep

19,4 Gtep

30,2 Gtep

**Seule l'énergie nucléaire peut fournir les besoins
énergétiques manquants**

***5,5 Gtep/an : 3 500 réacteurs nucléaires à construire en 40 ans
sans compter le dessalement de l'eau de mer.***

Bilan énergétique 2050

*** On utilise toutes les sources d'énergie et on peut supposer que le maximum a été fait pour économiser l'énergie**

*** On n'aura malheureusement tenu ni les promesses de développement durable ni celles du protocole de Kyoto**

*** On n'a même pas lésiné sur le coût du Mtep**

→ 100 réacteurs nucléaires nouveaux par an n'est pas réaliste. Cela signifie qu'il n'est même pas possible de respecter l'hypothèse la plus basse

Bilan énergétique 2050

On n'échappera pas néanmoins à un parc nucléaire conséquent au niveau mondial

Il faut s'y préparer et relever les divers challenges du nucléaire

Deux autres challenges sont également à relever impérativement :

- * Savoir stocker l'énergie**
- * Assurer la sûreté des stockages d'hydrogène**
→ recherche à orienter dans ce sens.

L'énergie nucléaire

La seule énergie issue du sol non émettrice de GES

Réserves estimées à 4 siècles


(+ extraction de l'eau de mer, réacteurs de génération IV)

Contrairement aux autres sources d'énergie, la technologie à mettre en œuvre pour l'exploiter est lourde.


En revanche, le pouvoir énergétique par unité de masse est 2 millions de fois plus élevé !

Pouvoir énergétique


1 gramme de carbone → 33 mille joules (combustion)

 × 2,5 millions

1 gramme d'uranium-235 → 82 milliards de joules (fission)

 × 7

1 gramme de deutérium → 560 milliards de joules (fusion)

 × 160

1 gramme de matière-antimatière → 90 000 milliards de joules
(annihilation)

Plus jamais, on ne fera un saut technologique aussi important que le jour où on est passé de la chimie classique au nucléaire !

Le réacteur nucléaire REP

10 filières de réacteur dans le Monde dont le « Réacteur à Eau ordinaire Pressurisée » installé en France (65,4% de la puissance installée au Monde)

59 unités installées en France (63,26 GWe au 01/01/08)

76,8% sur 86,9% du thermique

Le coût du combustible

Compte tenu du pouvoir énergétique massique élevé, le coût du combustible est faible :

0,58 c€/par kWh

de la mine au stockage des déchets ultimes

Ce faible coût a une incidence faible sur le prix du kWh

→ **Prix stable dans le temps**

Le réacteur de demain

L'EPR (european pressurized water reactor)

Retour d'expérience de 1300 ans-réacteur

60 à 70 ans de durée de vie

1^{er} : Finlande (2011)

2nd : France (2012)

Ceci nous mène largement au-delà de 2050

Les réacteurs d'après-demain

→ Fission : réacteurs de 4^{ème} génération

**Gas-cooled
Fast
Reactor**

**Lead-cooled
Fast
Reactor**

**Molten
Salt
Reactor**

**Sodium-cooled
Fast
Reactor**

**SuperCritical
Water-cooled
Reactor**

**Very High
Temperature
Reactor**

*Les filières à neutrons rapides font passer les réserves
de 4 à plusieurs dizaines de siècles.*

Elle en fait même une source d'énergie renouvelable.

Les réacteurs d'après-après demain

→ Réacteurs à fusion ? (*encore Jules Verne*)

Projet ITER :

prototype pour

2050 - 2060

Source d'énergie inépuisable

Technologie encore plus lourde que pour la fission

**Déchets : autant de Bq que pour la fission par kWh fourni
mais tritium et produits d'activation (neutrons de 14 MeV)**

Retour d'expérience sur 30 ans (France)

*En 2007, les centrales nucléaires ont permis
d'éviter les rejets, en France, de :*

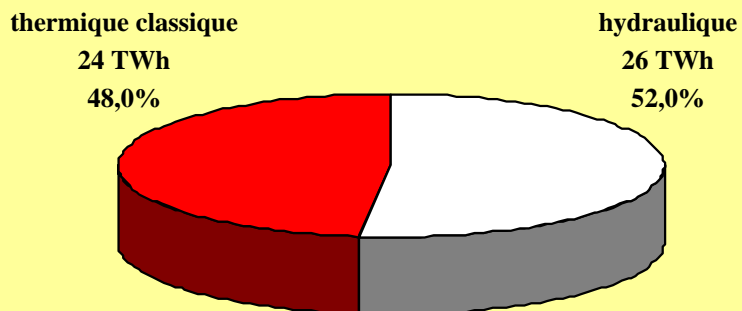
- **88 000 tonnes de poussières**
- **2,3 millions de tonnes de dioxyde de soufre**
(170% des autorisations de rejet)
- **1,25 million de tonnes de dioxyde d'azote**
- **425 millions de tonnes de gaz carbonique**
(soit 215 milliards m³)

*Un seul accident (niveau 4) : endommagement du
cœur de la centrale de Saint-Laurent il y a 28 ans*

Production française d'électricité

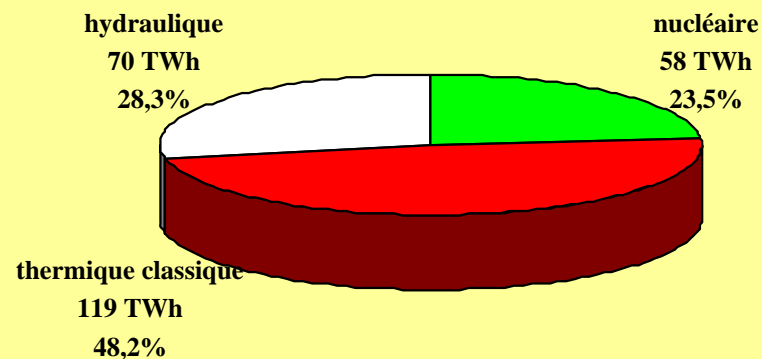
1955

50 milliards de kWh (TWh)



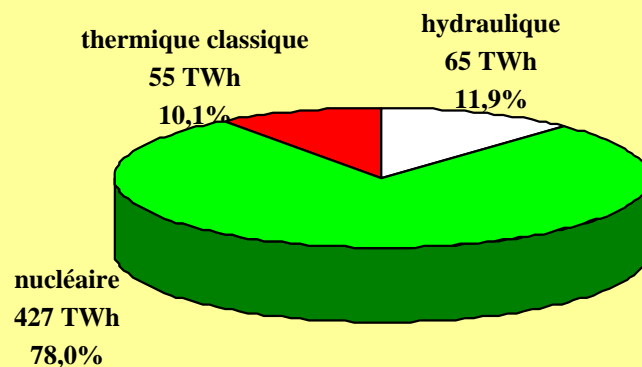
1980

247 milliards de kWh (TWh)



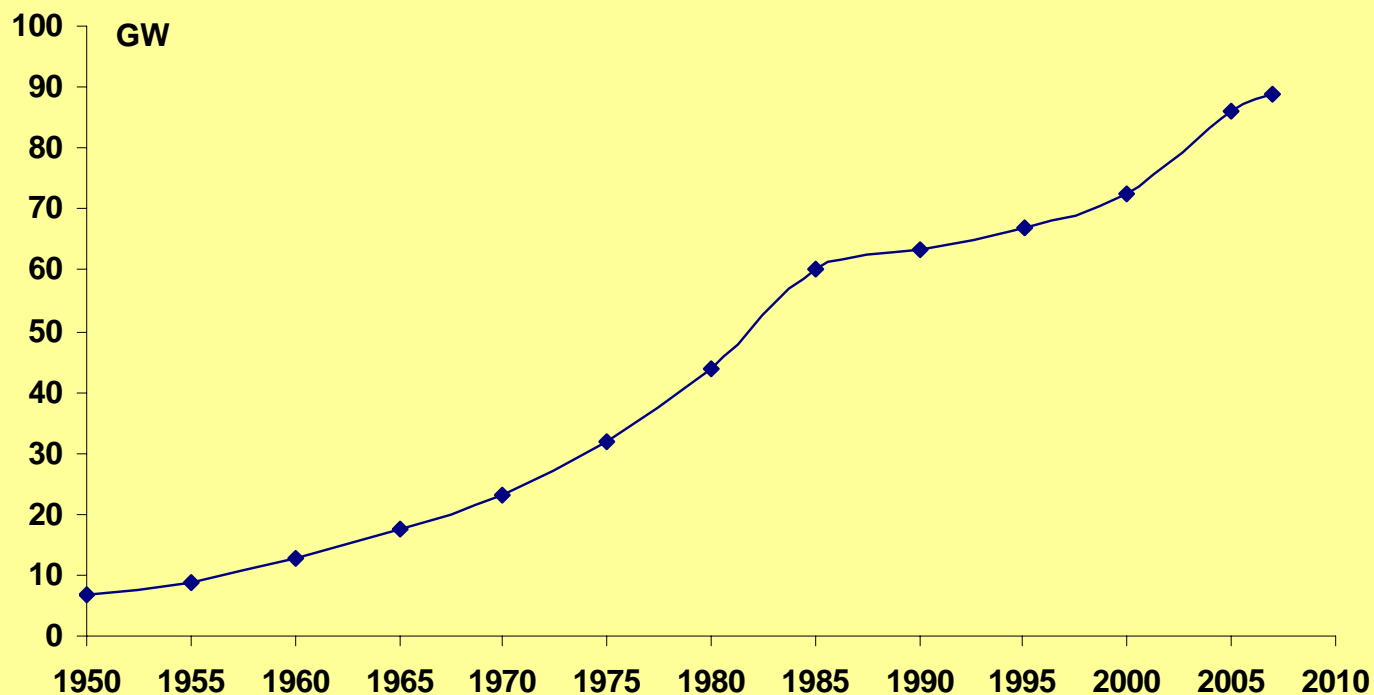
2005

547 milliards de kWh (TWh)



Puissance appelée sur le réseau français

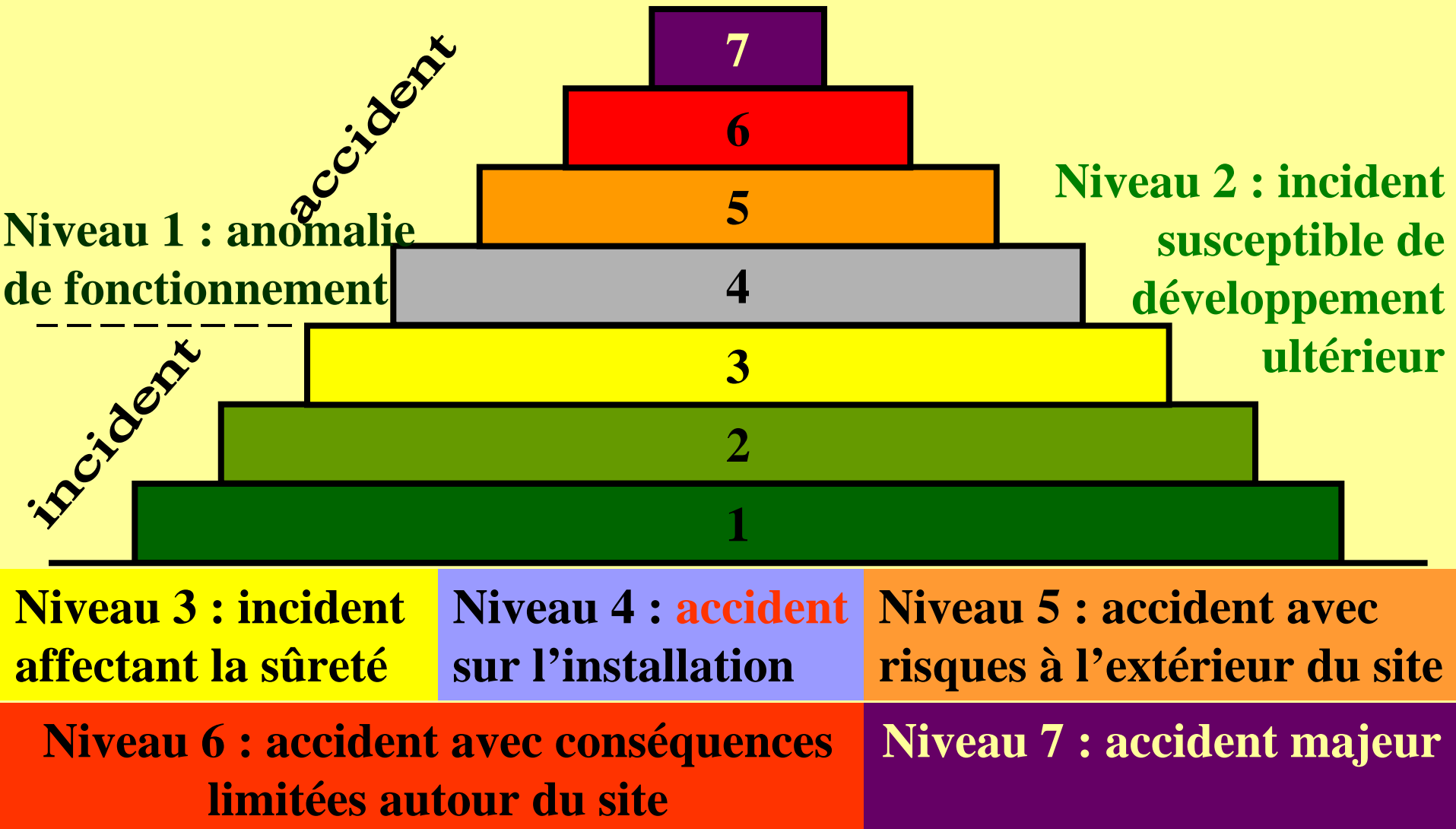
Puissance maximale appelée par le réseau
+ 4,6% par an en moyenne sur 50 ans



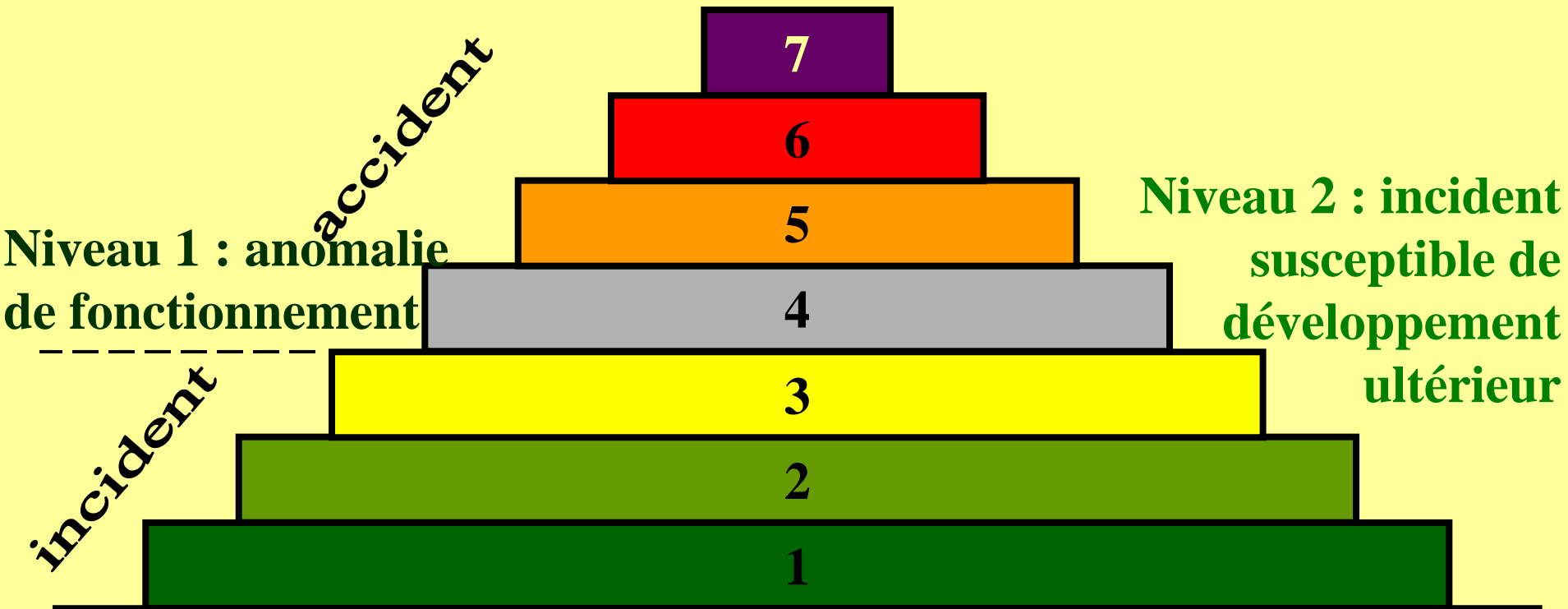
Nucléaire, communication et transparence

Les **incidents** et **accidents** concernant l'industrie nucléaire sont classés sur une échelle de gravité : **INES** (**I**nternational **N**uclear **E**vents **S**cale) comprenant 7 échelons (**3** + **4**)

Echelle Internationale des Evènements Nucléaires



Echelle Internationale des Evènements Nucléaires



Pour le parc électronucléaire français, en moyenne par an :
environ 100 incidents de niveau 1

1 à 2 incidents de niveau 2

pas d'incident de niveau 3 depuis 1981 ni d'accident depuis 1980

Conclusions

1) relever les divers challenges du nucléaire :

Quels types de réacteurs pour demain ?

Problèmes de sûreté, de non-prolifération

La gestion des déchets

L'acceptation par la population

La formation.

Conclusions

2) Le problème des déchets radioactifs

→ oui, il y a bien un problème de déchets hautement toxiques

Mais cela dépasse le problème des déchets hautement radioactifs qui ne représentent que 0,005 % des déchets hautement toxiques, chimiques ou autres.

Si l'effort budgétaire consacré au problème des déchets hautement radioactifs était étendu, à proportion égale, à tous les déchets hautement toxiques, cela représenterait, uniquement pour la France :

huit mille milliards d'euros par an

soit le cinquième du PIB mondial !

Conclusions

3) Sortir du nucléaire ?

439 réacteurs en activité dans le monde, 37 en construction et en projet : **passer de 380 GW installés en 2005 à 800 GW en 2030**
(pour les USA : perspective mondiale à 1 000 GW dont 300/1 000 pour les USA)

Pays impliqués (octobre 2009) :

USA, Chine, Russie, Inde, Japon, Corée du Sud, Afrique du Sud, Royaume-Uni, Suède, Taiwan, France, Vietnam, Ukraine, Suisse, Mexique, Canada, Brésil, Argentine, Indonésie, Emirats, Italie, Algérie, Biélorussie, Hongrie, Bulgarie, Kazakhstan, Chili, République Tchèque, Slovaquie, Lituanie.

Australie ? Allemagne ?

En conclusion

« L'ère du pétrole bon marché, c'est fini. Le nucléaire est plus que jamais une industrie d'avenir et une énergie indispensable.

Chaque EPR fait économiser 2 milliards de m³ de gaz par an quand il remplace une centrale à gaz et 11 millions de tonnes de rejets de CO₂ par an quand il remplace une centrale à charbon.

L'électricité qui sort d'un EPR est 30 à 50% moins chère que l'électricité qui sort d'une centrale à gaz ou à charbon. On peut devenir exportateur d'électricité alors qu'on a ni pétrole ni gaz.

C'est une chance historique de développement. »

Extrait du discours du Président de la République, Le Creusot – 3 juillet 2008

A sunset landscape with a large tree silhouette on the left and reeds in the foreground. The sky is filled with vibrant orange and red clouds, transitioning to a dark purple and blue at the top. The foreground is dark, with some reeds visible in the lower center.

Merci de votre attention