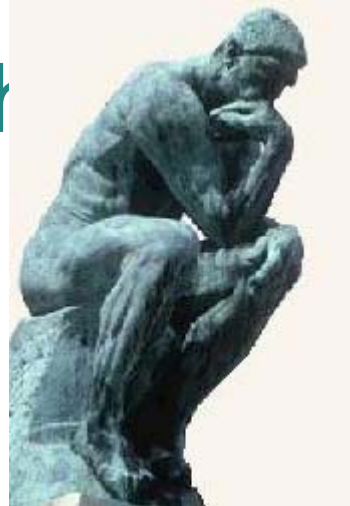


26 janvier 2012

L'énergie nucléaire est-elle une énergie d'avenir

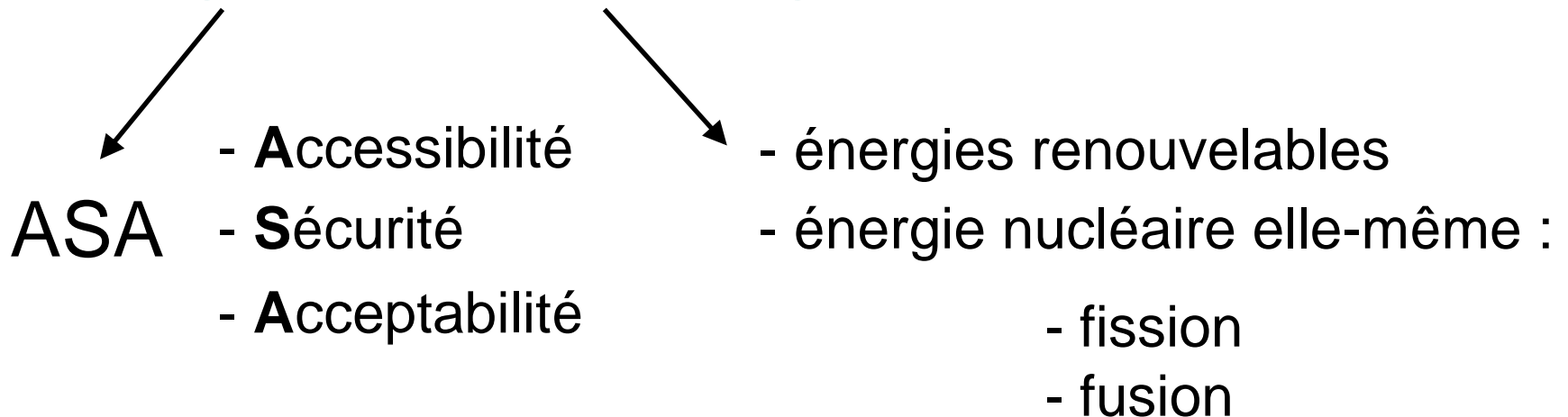
compte tenu des progrès
technologiques ?



Avenir ? ⇒ 2030 – 2060

⇒ population mondiale 7×10^9 - 8×10^9

Progrès technologiques ?

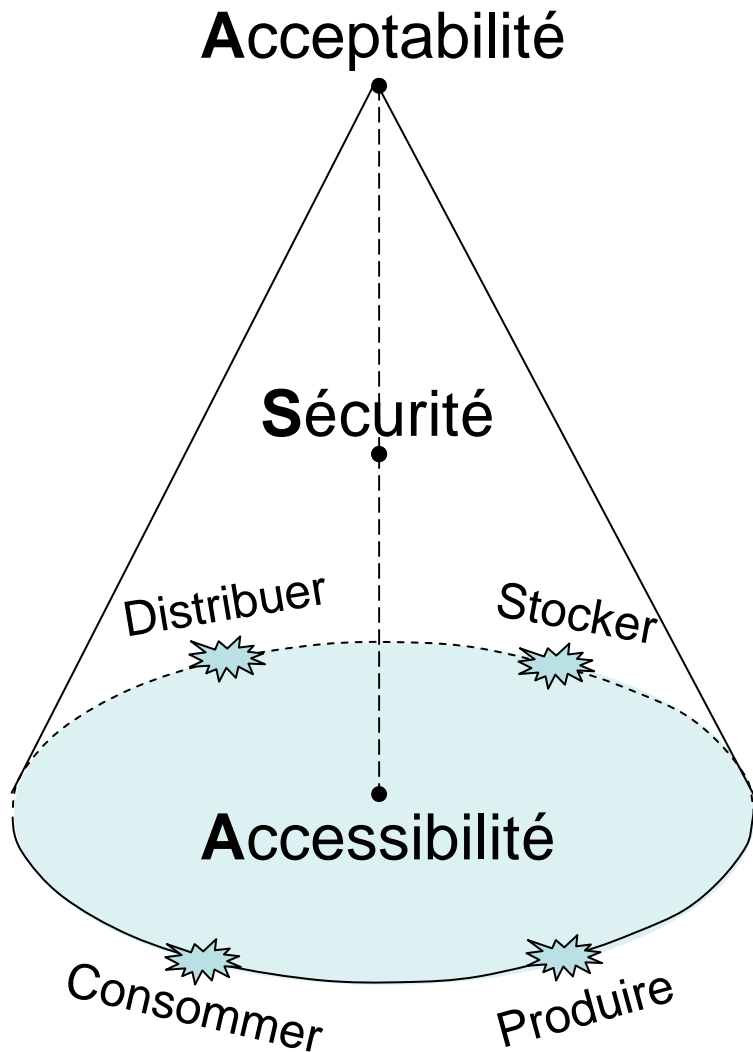


Eclairages

- technico-scientifiques
- socio-économiques

ASA versus FILIERES

France 2010



Pétrole	33 %	
Gaz	15 %	
Charbon	5 %	
Nucléaire	41 %	
Biomasse	3 %	
Hydraulique	2 %	
Géothermie	0,2 %	
Solaire	0,05 %	
Eolien	0,5 %	
Marines	0,25 %	
Autres ?		
	94 %	6 %

TRANSFERTS ENERGETIQUES

Production		Vecteurs	Stockage	Distribution		Consommation
Réaction				Réseau	H R	
Pétrole	Combustion	Thermique	0	XX	X	G E S
Gaz	”		0	XX	X	Gaz à effet serre
Charbon	”		0	XX	X	”
Biomasse	”	Electricité	0	X	X	”
Nucléaire	Fission		0	XXX		RAD Radioactivité
Hydraulique	Mécanique	Electricité	0 ?	XXX		D I
Eolien	”	”	Intermittent	XXX		Déchets industriels
Marines	”	”	”	XXX		”
Solaire	Photovoltaïque	”	”	X	X	”
	Eau chaude	Thermique	”		X	”
Géothermie		Thermique	0 ?		X	”

CHOIX ET DEFIS

2 configurations

- générale : Réseau
- ponctuelle : Hors-réseau

2 vecteurs

- électricité
- thermique : pétrole, gaz ...

4 préoccupations

Ressources

- stockage
- réserves

Fins de cycle

- gaz à effet de serre (GES)
- déchets radioactifs (RAD)

France : consommation d'énergie finale (corrigée du climat) par secteur

France: final energy consumption (corrected for climate) by sector

Mtep Mtoe	1973	1980	1990	2000	2010	%/an %/Year 1973-2010	Parts (%) Share (%) 1973 2010	
	Industrie Industry	48	45	38	39	35	-0,8	33,1
dont sidérurgie of which iron and steel industry	13	11	7	6	5	-2,4	8,6	2,9
Résidentiel- tertiaire Residential-tertiary	56	54	58	67	68	0,5	38,9	40,1
Agriculture	4	3	4	3	4	0,3	2,6	2,5
Transports	26	32	41	49	50	1,8	17,9	29,5
Total énergétique Energy total	134	134	141	158	158	0,4	92,4	92,9
Total non énergétique Not energy total	11	12	12	17	12	0,3	7,5	7,1
Total	145	146	153	175	170	0,4	100	100

Source : Bilan énergétique de l'année 2010 en France, Observatoire de l'énergie

France : consommation d'énergie finale (corrigée du climat) par énergie

France: final energy consumption (corrected for climate) by energy

Mtep Mtoe	1973	1980	1990	2000	2010	%/an %Year 1973-2010	Parts (%) 1973	Share (%) 2010
Charbon Coal	18	13	10	7	6	-3,1	13,2	3,6
Pétrole Oil	85	78	71	74	66	-0,7	63,9	42
Gaz Gas	9	17	23	33	34	3,8	6,5	22
Electricité Electricity	13	18	26	34	38	2,9	9,7	24,1
Energies renouvelables thermiques Thermal renewable energies	9	8	11	11	14	1,3	6,7	9,1
Total	134	134	141	159	158	0,4	100	100

Source : Bilan énergétique de l'année 2010 de la France, Service de l'Observation et des Statistiques

France : bilans électriques

TWh	Consommation Consumption		Echanges avec l'étranger (3) Balance (3)	Production intérieure Inland Production				Total
	Intérieure (1) Inland (1)	Nette (2) Net (2)		Thermique classique Conventional Thermal	Hydraulique Hydro	Nucléaire Nuclear	Autres renouvelables Other renewables	
1950	33	29	0	17	16	-	-	33
1955	50	44	0	24	26	-	-	50
1960	72	65	0	32	41	0	-	72
1965	102	94	1	54	46	1	-	101
1970	140	130	-1	79	57	5	-	141
1975	181	168	3	101	60	17	-	179
1980	249	232	3	119	70	58	-	247
1985	303	280	-23	52	64	213	-	329
1990	350	323	-46	45	57	298	-	400
1995	397	369	-70	37	76	359	-	471
2000	441	411	-69	50	72	395	-	517
2005	482	450	-60	59	56	430	4	549
2007	480	448	-56	55	63	419	7,9 (dont éolien : 4)	545
2008	495	461	-47	53	68	418	9,6 (dont éolien : 5,6)	549
2009	486	453	-25	55	62	390	12,2 (dont éolien : 7,8)	519
2010	513	476	-30	59	68	408	15 (dont éolien : 9,6, photovoltaïque : 0,6)	550

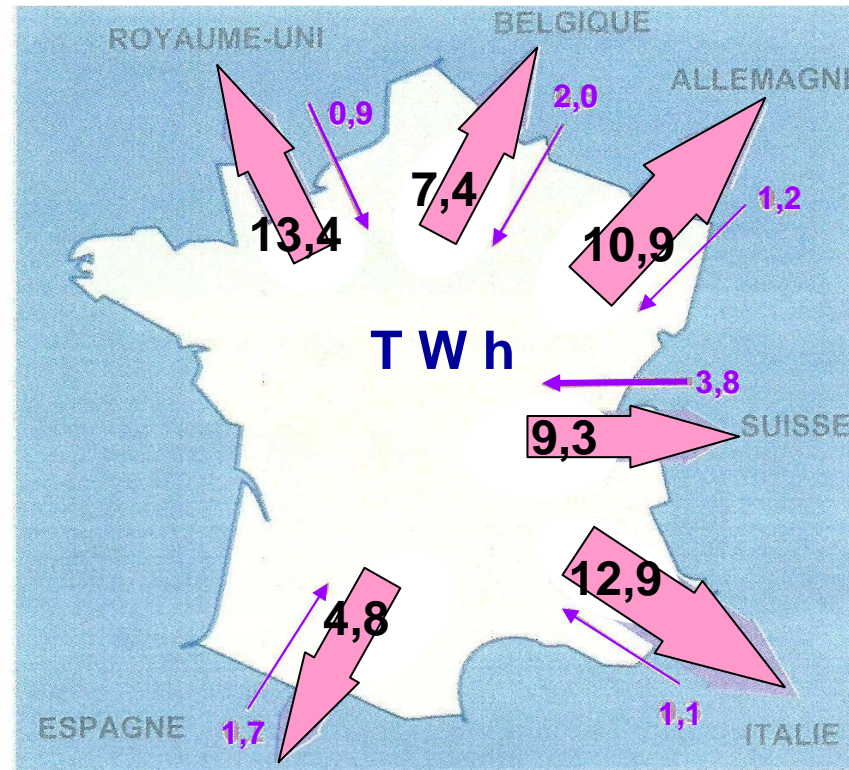
(1) La consommation intérieure est égale à la somme de la production nationale et des échanges d'électricité, déduction faite de l'énergie de pompage **Inland consumption equals domestic generation plus imports minus exports & energy used for pumping**

(2) La consommation nette est égale à la consommation intérieure moins les pertes de transport et de distribution **Net consumption equals inland consumption minus transportation and distribution losses**

(3) Echanges : Importations (+), Exportations (-) **Balance: Imports (+), Exports (-)**

Source : RTE (Energie électrique en France en 2010)

Echanges physiques d'électricité avec l'étranger en 2008



Quelques ordres de grandeur pour la production d'électricité

La quantité d'électricité obtenue en un an avec une puissance de 1 000 MW électriques, soit près de 9 TWh, peut être obtenue avec un des moyens de production suivants :

thermonucléaire	: une tranche REP
photovoltaïque	: 100 kilomètres carrés (rendement : 10 %, Europe centrale)
éolien	: 3 500 éoliennes ¹ de 70 mètres de diamètre, d'une hauteur comprise entre 100 et 130 m
biomasse	: 30 000 kilomètres carrés de forêt
thermique à flamme	: { charbon : 2,3 millions de tonnes par an pétrole : 1,9 million de tonnes par an gaz (CCG) ² : 1,4 milliard de mètres cubes par an

* : 1 TWh = 1 milliard de kWh.

¹ : fonctionnant 2 500 heures par an, pour un vent dont la vitesse moyenne est de 7 m/s.

² : CCG = centrales à cycle combiné au gaz.

Source : Observatoire de l'Énergie.

Puissances maximales appelées par le réseau en France (GWe)

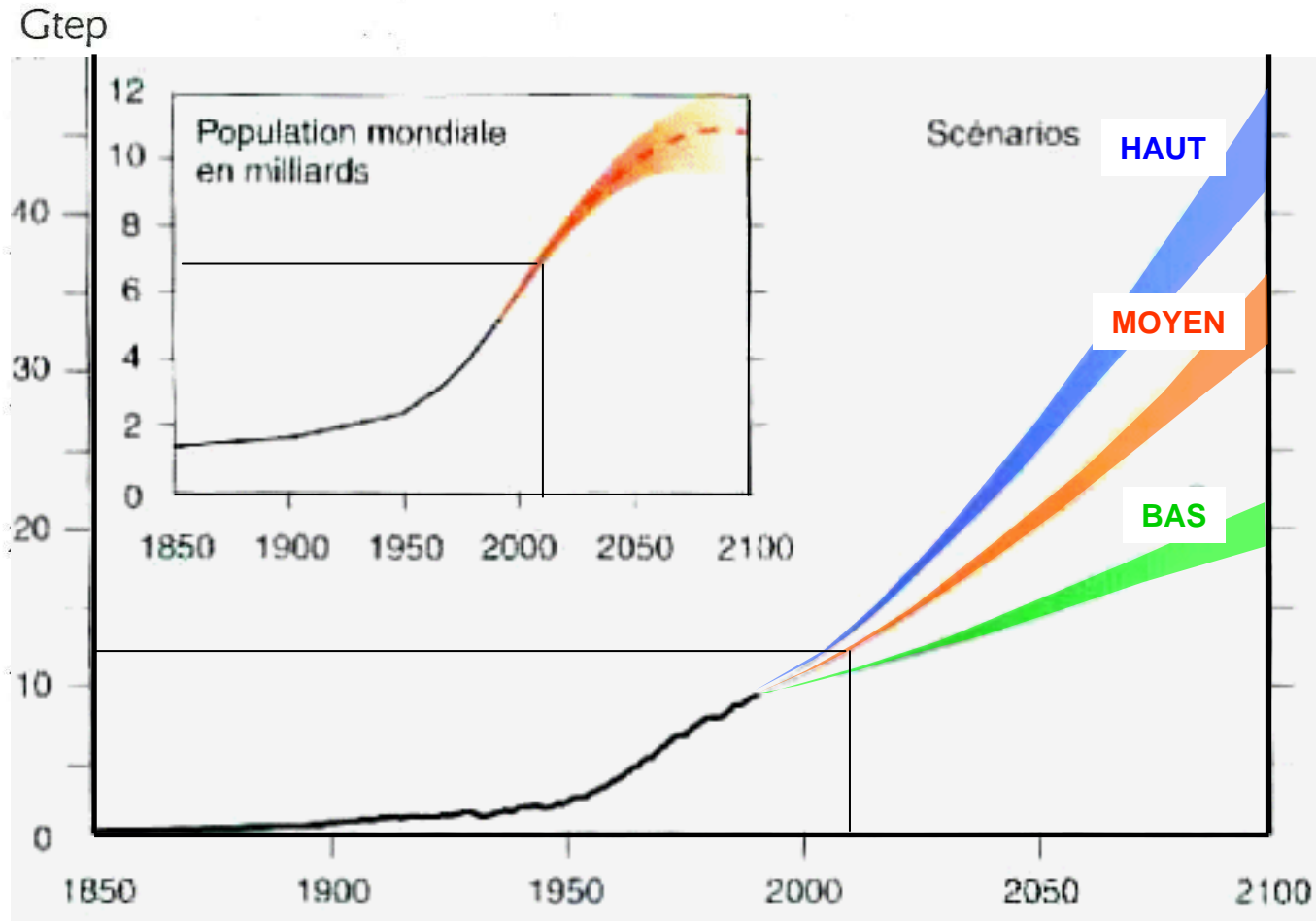
Peak load demand of the french grid (GWe)

1950	jeudi 21 décembre	Thursday December 21	6,6 GWe	3,5
1955	mercredi 21 décembre	Wednesday December 21	8,9 GWe	
1960	jeudi 15 décembre	Thursday December 15	12,9 GWe	
1965	jeudi 9 décembre	Thursday December 9	17,5 GWe	14
1970	vendredi 18 décembre	Friday December 18	23,3 GWe	
1975	mardi 16 décembre	Tuesday December 16	32 GWe	
1980	mardi 9 décembre	Tuesday December 9	44,1 GWe	
1985	mercredi 16 janvier	Wednesday January 16	60 GWe	
1990	lundi 17 décembre	Monday December 17	63,4 GWe	
1995	lundi 5 janvier	Monday January 5	66,8 GWe	
2000	mercredi 12 janvier	Wednesday January 12	72,4 GWe	
2005	lundi 28 février	Monday February 28	86 GWe	
2010	jeudi 11 février	Thursday February 11	93,1 GWe	

Source : Statistiques de l'énergie en France, RTE, éd. juillet 2010

Evolution de la consommation mondiale d'énergie depuis 1850 et projections jusqu'en 2100 selon trois scénarios (hors énergies nouvelles)

en insert, évolution de la population mondiale



Source : IIASA, rapport 1995

Monde : consommation versus population

Année 2008 Year 2008	Consommation finale d'énergie par habitant (kep/hab) Final consumption of energy per capita (koe/capita)	Consommation finale d'énergie par unité de PIB ⁽¹⁾ (kep/millier US\$2000) Final consumption of energy per GDP unit ⁽¹⁾ (koe/thousand US\$2000)	Consommation finale d'électricité par habitant (kWh/hab) Final consumption of electricity per capita (kWh/capita)	Consommation finale d'électricité par unité de PIB ⁽²⁾ (kWh/millier US\$2000) Final consumption of electricity per GDP unit ⁽²⁾ (kWh/thousand US\$2000)	
Amérique du Nord ⁽³⁾ North America ⁽³⁾	4 185	133	11 113	353	
dont Etats-Unis of which USA	5 064	131	13 647	354	38,5
Amérique latine Latin America	949	111	1 956	230	
dont Brésil of which Brazil	1 018	119	2 232	260	
Europe OCDE OECD Europe	2 358	96	6 290	256	
Europe non OCDE Non OECD Europe	1 293	124	3 381	324	
Union européenne 27 European Union 27	2 445	97	6 384	254	
dont France of which France	2 582	95	7 704	282	27,3
Ex-URSS FSU	2 340	260	4 660	517	
Moyen-Orient Middle East	1 954	238	3 384	412	
Afrique Africa	492	194	571	225	2,5
Asie Asia	669	119	1 383	245	
dont : of which:					
Chine China	1 035	125	2 471	298	8,2
Inde India	358	95	566	150	3,7
Pacifique OCDE ⁽⁴⁾ OECD Pacific ⁽⁴⁾	2 748	101	8 618	316	
Total Monde World Total	1 260	132	2 782	291	9,5
dont OCDE of which OECD	3 106	112	8 486	307	

(1) Consommation finale d'énergie/ PIB Final consumption of energy/ GDP

(2) Consommation finale d'électricité / PIB Final consumption of electricity / GDP

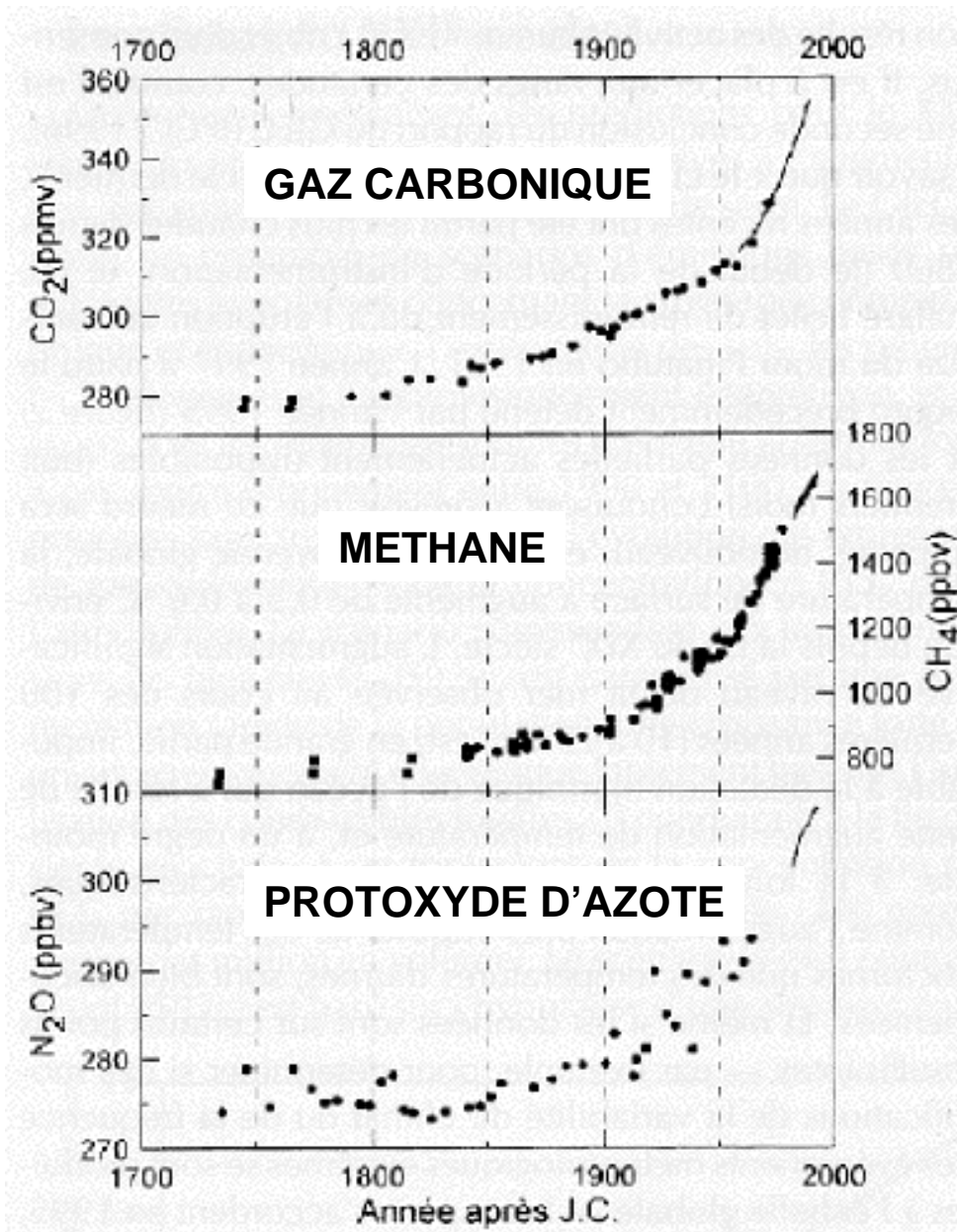
(3) Etats-Unis, Canada, & Mexique USA, Canada, & Mexico

(4) Australie, Corée du Sud, Japon et Nouvelle Zélande Australia, South Korea, Japan and New Zealand

Nota : à la différence des zones géographiques mentionnées, les données pour la France et les Etats-Unis comprennent les combustibles renouvelables et déchets

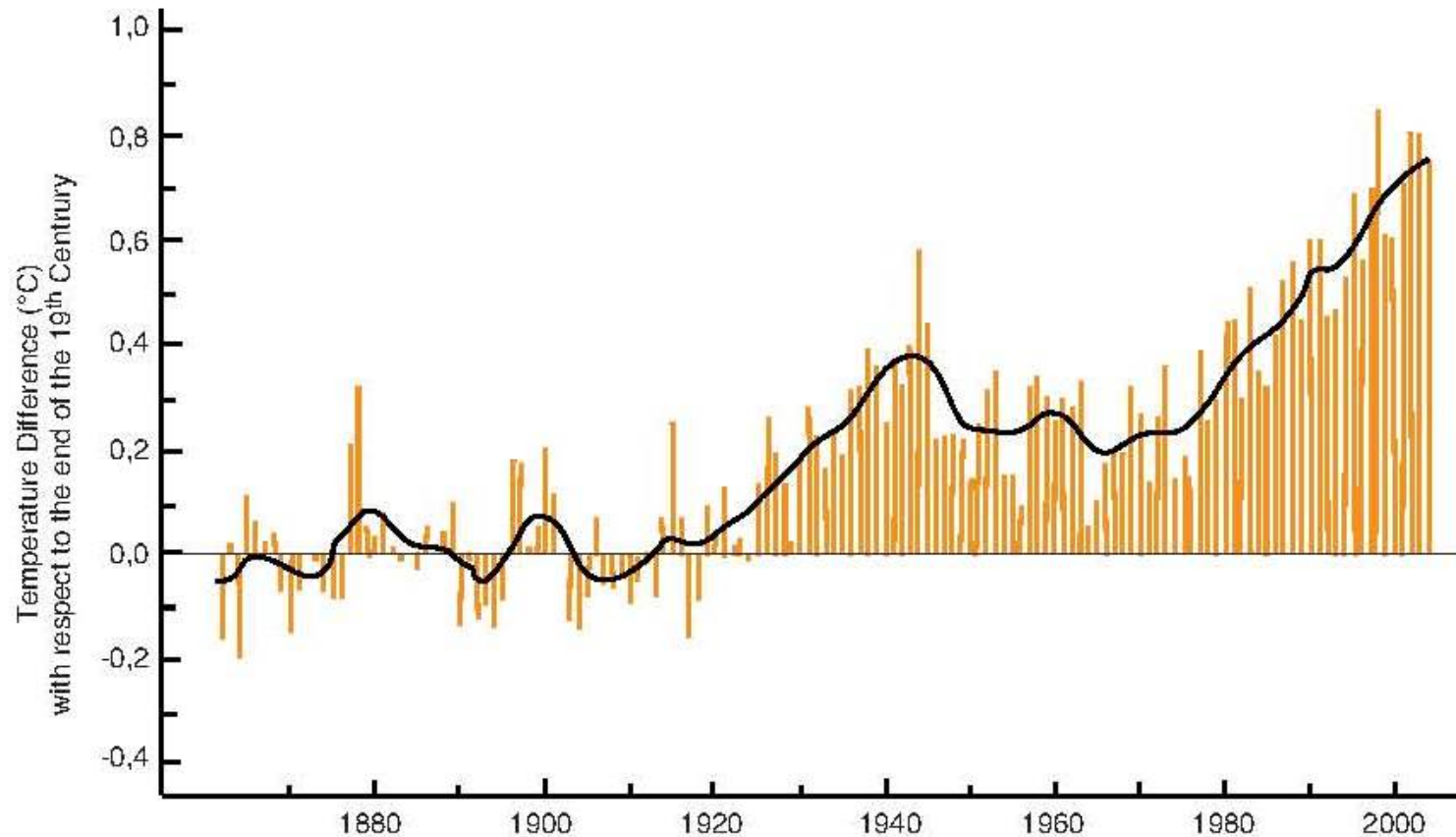
Nota: unlike mentioned geographical areas, data for France and United States include combustible renewables and waste

Source : Bilans Energétiques, AIE, éd 2010 Energy Balances, IEA, 2010 ed



Variation de la température moyenne de la surface terrestre par rapport à 1861

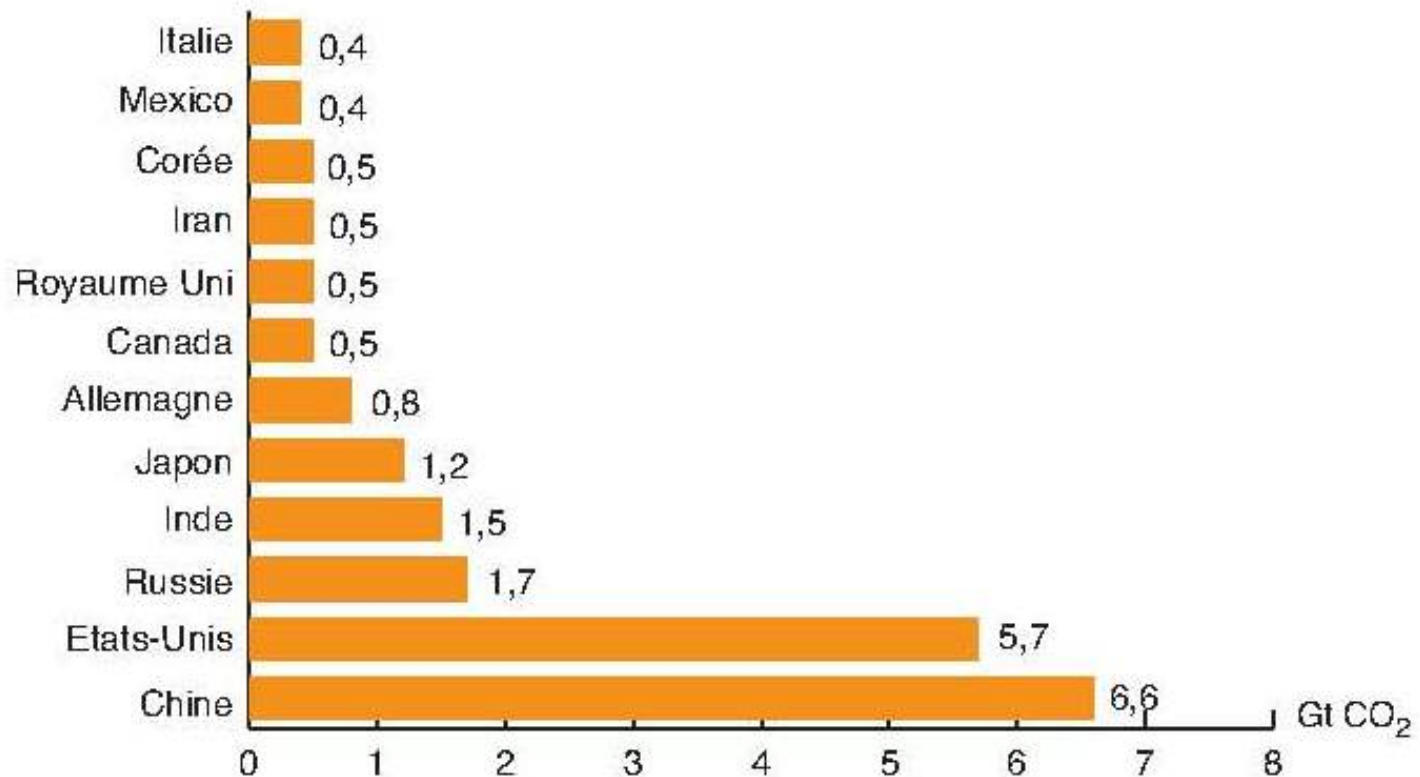
Change in average surface temperature compared to 1861



Source : Hadley Center for Climate Prediction and Research

Plus gros émetteurs de CO₂ en 2008

The 10 biggest CO₂ emitters in 2008



Source : CO₂ Emissions from fuel combustion, AIE, éd. 2010

Emissions types de la production électrique (valeurs pour les kWh d'EDF *)

Filières	Emissions** (g équiv. CO ₂ /kWh)
Eoliennes ***	12
Nucléaire	4
Hydraulique fil de l'eau	6
Hydraulique retenue	7
Hydraulique pompage	109
TAC (turbine à combustion)	1 200
Diesels	897
Charbon 600 MW (avec désulfuration)	1 010
Fioul	1 080
Charbon 250 MW (sans désulfuration)	1 058

* Résultats issus d'études ACV

** Les émissions considérées sont les principaux gaz contribuant à l'effet de serre. La pondération par leur potentiel de réchauffement global respectif, à horizon 100 ans, permet d'obtenir l'indicateur exprimé en équivalent CO₂.

*** Les valeurs retenues sont celles publiées par EcoInvent.

Source : Profil Environnemental du kWh EDF; EDF 05/2011 ; coefficients 2011 d'après données filières 2009 sur www.edf.fr

LOIS PHYSIQUES

Energie = rupture d'un état lié / force en action

4 interactions fondamentales de l'Univers

- gravitation \Rightarrow *énergie cinétique*
- interaction faible \Rightarrow *fusion nucléaire*
- interaction forte \Rightarrow *fission nucléaire*
- interaction électromagnétique \Rightarrow *cortège électronique atome*
 \Rightarrow *énergie chimique, électrique, calorifique, radiative ...*

Energie = se transforme, se conserve

2^{ème} principe de CARNOT

Potentiels énergétiques

1 GWh = 0,086 ktep

1 homme – énergie biochimique (aliments + air)

repos, 37°C : \longleftrightarrow 100 W activité physique : \longleftrightarrow 500 W

3,67 t eau / 100m – énergie cinétique \longrightarrow 1 kWh

1 kg charbon – combustion \longrightarrow 8 kWh

1 kg pétrole, gaz – combustion \longrightarrow 12 kWh

1 kg H₂ – combustion \longrightarrow 39 kWh

centrale thermique 1000 MWe \longleftrightarrow 1 500 000 t pétrole / an

1 kg U – fission \longrightarrow 10 000 kWh

centrale électronucléaire 1000 MWe \longleftrightarrow 27 t U / an

1 kg H₂ \rightarrow H₃ – fusion \longrightarrow 180 000 000 kWh

soleil

Ressources potentielles des énergies renouvelables

SOLAIRE

Puissance reçue au-dessus de l'atmosphère	1,4 kW / m ²
Puissance reçue au niveau du sol	1 kW / m ²
Durée annuelle d'ensoleillement (France)	1750 à 3000 h/an
Energie reçue par m ² de surface horizontale (France)	1100 à 1900 kWh/m ² /an

EOLIEN

Gisement France	12 000 MWe
-----------------	------------

GEOOTHERMIE

Flux géothermique	0,05 à 0,1 W/m ²
Gradient géothermique	3,3 °C/100m
Gisement basse énergie $\theta < 100^{\circ}\text{C}$ (France)	6 Mtep/an

MARINES

Marées - gisement mondial	100 à 300 GWe
- puissance installée Usine de la Rance	250 MWe
Vagues	
- puissance par mètre de vague	30 à 40 kW/m
Thermique	
- gisement mondial	10 TWe

Stockage et nouveaux vecteurs

Accumulateurs – piles : systèmes électrochimiques

(*Densité énergie massique*)

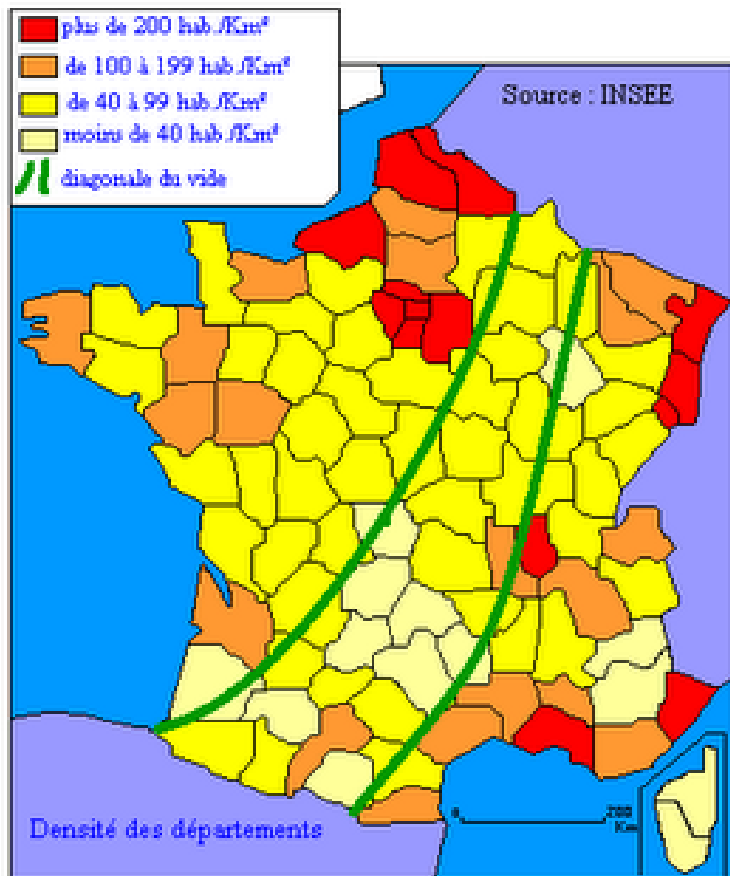
Batteries au Pb 30 Wh / kg

Ni - Cd 50 Wh / kg

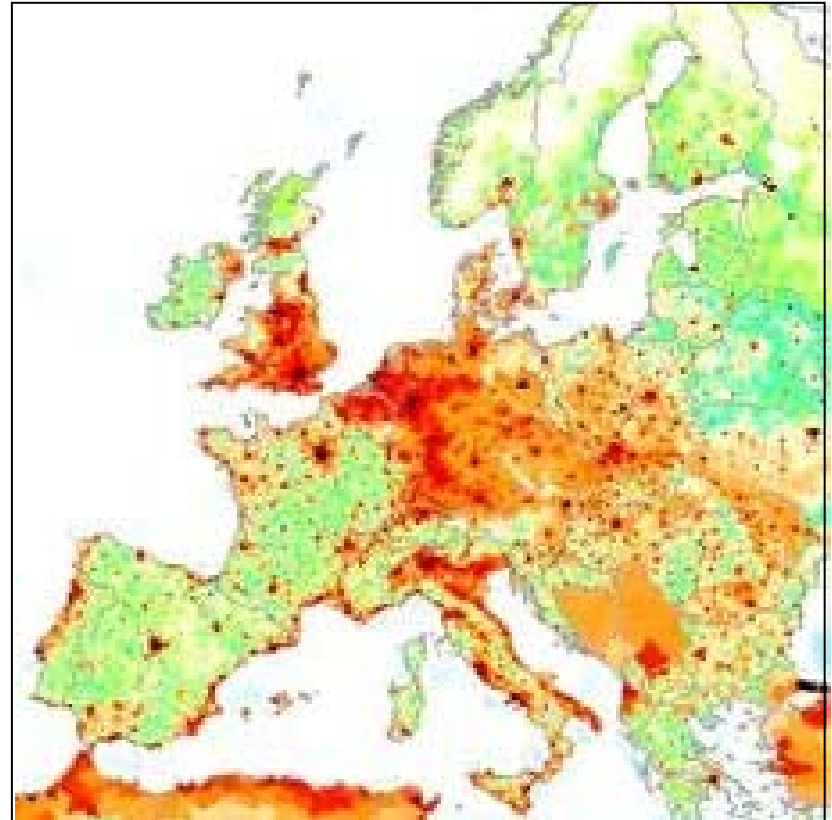
Ni – Métal Hydrure 80 Wh / kg

Li - Ion 260 Wh / kg

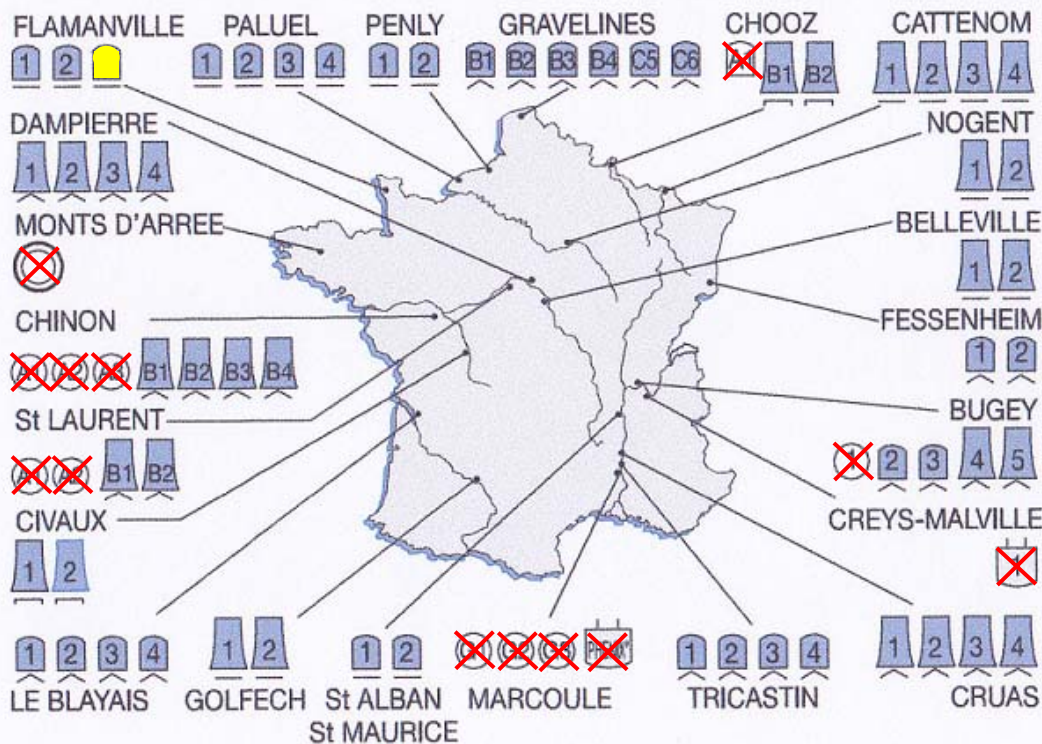
Vecteur Hydrogène



Diagonale du vide



CARTE DES UNITES ELECTRONUCLEAIRES EN FRANCE AU 01-01-2011



SITUATION DES UNITÉS

- 58** Installées
- 1** En construction
- 11** Tranches déclassées
- ~~2~~ Arrêtées

FILIÈRE DE RÉACTEUR

- UNGG
- ⊙ Gaz - eau lourde
- Surgénérateur
- REP refroidissement circuit ouvert
- REP refroidissement circuit fermé (tours)

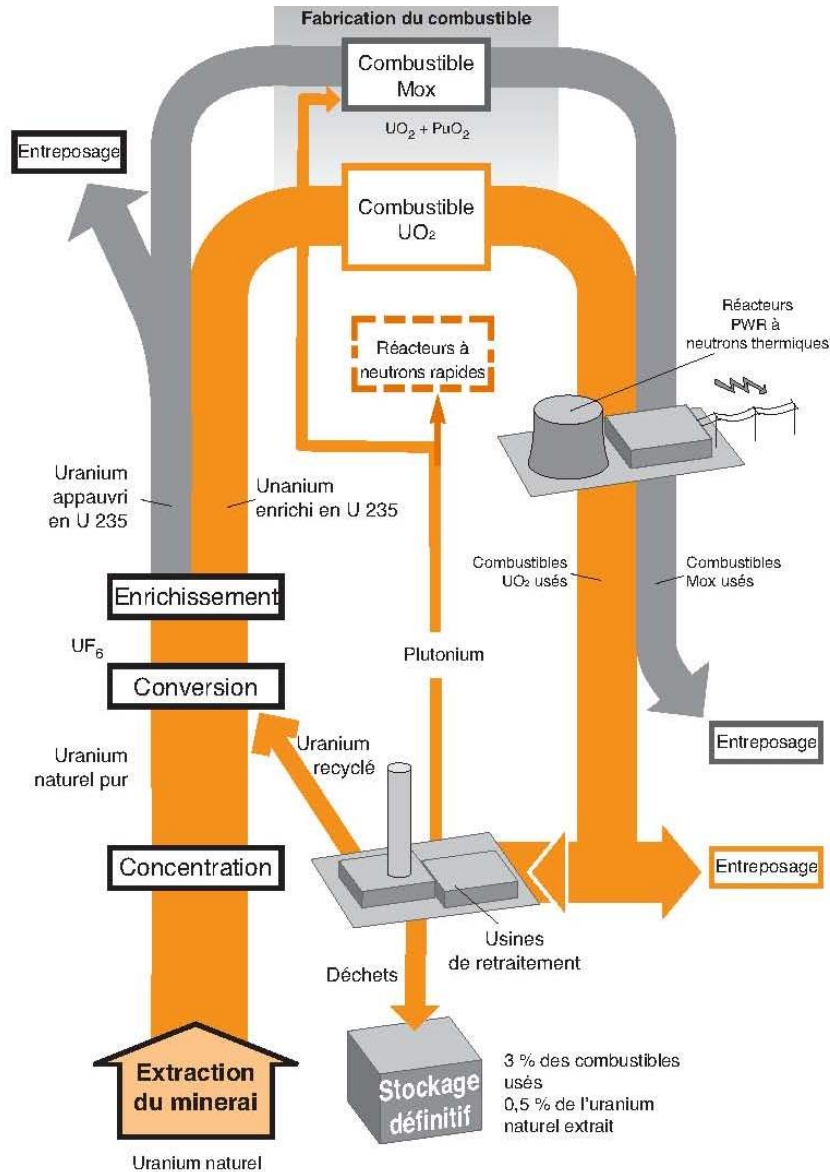
PALIER REP STANDARDISÉ

- ^ 34 - REP 900 MWe
- 20 - REP 1 300 MWe
- 4 - N 4

ElecNuc - Edition 2011 - CEA

REP : réacteur à eau ordinaire sous pression

Cycle simplifié du combustible nucléaire en France



PRINCIPAUX ELEMENTS CONTENUS DANS LES COMBUSTIBLES USES

en kg/tonne de combustible REP 1300. après 3 ans de refroidissement

Actinides

Np	0,43
Pu	10
Am	0,38
Cm	0,042

Total 10,852 kg

Uranium

Total 935,548 kg

Produits de fission

Kr, Xe	6,0	Ru, Rh, Pd	0,86
Cs, Rb	3,1	Ag, Cd,	0,25
Sr, Ba	2,5	In, Sn, Sb	
Y, La	1,7	Autres	
Zr	3,7	Ce	2,5
Se, Te	0,56	Pr	1,2
Mo	3,5	Nd	4,2
I	0,23	Sm	0,82
Tc	0,23	Eu	0,15

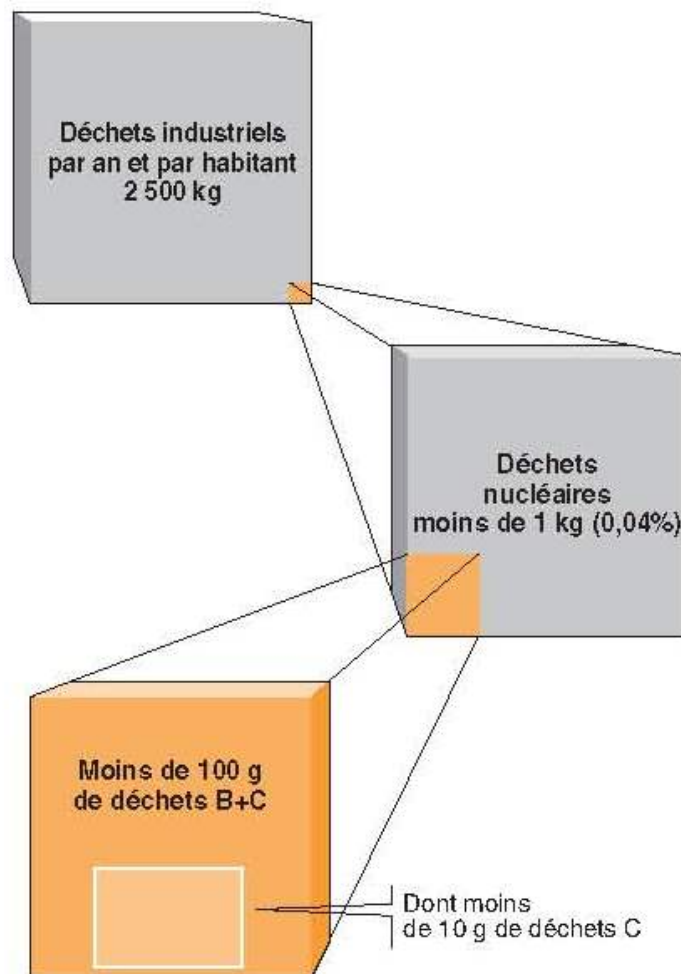
Total 35,6 kg

Source : CNE

<p>Très faible Activité (TFA)</p>		<p>Déchets TFA stockés en surface au Centre de stockage TFA de l'Aube</p>	<p>A β, γ Labos, médecine nucléaire Industrie, gants, filtres, résines</p>	
<p>Faible Activité (FA)</p>	<p>Déchets VTC gérés sur place par décroissance radioactive. Ils sont ensuite gérés comme des déchets classiques.</p>	<p>Déchets FMA-VC Stockés en surface au Centre de stockage FMA de l'Aube qui a succédé au Centre de stockage de la Manche, aujourd'hui fermé et sous surveillance.</p>	<p>Déchets FA-VL Centre de stockage à faible profondeur (entre 15 et 200 m) à l'étude. Mise en service prévue en 2019.</p>	<p>B α</p>
<p>Moyenne Activité (MA)</p>			<p>Déchets MA-VL Centre de stockage profond (à 500 m) à l'étude. Mise en service prévue en 2025.</p>	
<p>Haute Activité (HA)</p>	<p>Déchets HA Centre de stockage profond (à 500 m) à l'étude. Mise en service prévue en 2025.</p>		<p>C α, β, γ Retraitement Combustibles irradiés</p>	
	<p>Vie très courte (VTC) période radioactive < 100 jours</p>	<p>Vie courte (VC) période radioactive ≤ 31 ans</p>		<p>Vie longue (VL) période radioactive > 31 ans</p>

Durée de vie 

DECHETS PRODUITS EN FRANCE

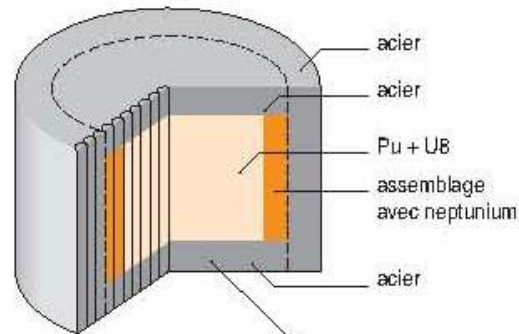


Source : CEA

Réacteur à neutrons rapides Incinérateur d'actinides

Pour 10 TWh produits,
1 000 kg de Pu brûlés
800 kg de Pu produits

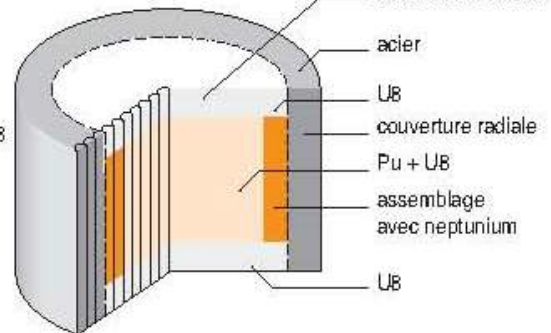
cœur sous-générateur



Pour 10 TWh produits,
1 000 kg de Pu brûlés
1 000 kg de Pu produits

cœur régénérateur

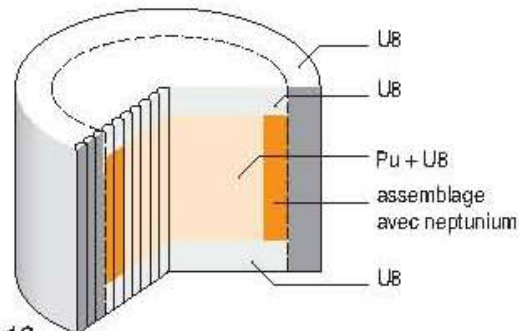
U8 : uranium 238
Pu : plutonium



Pour 10 TWh produits,
1 000 kg de Pu brûlés
1 200 kg de Pu produits

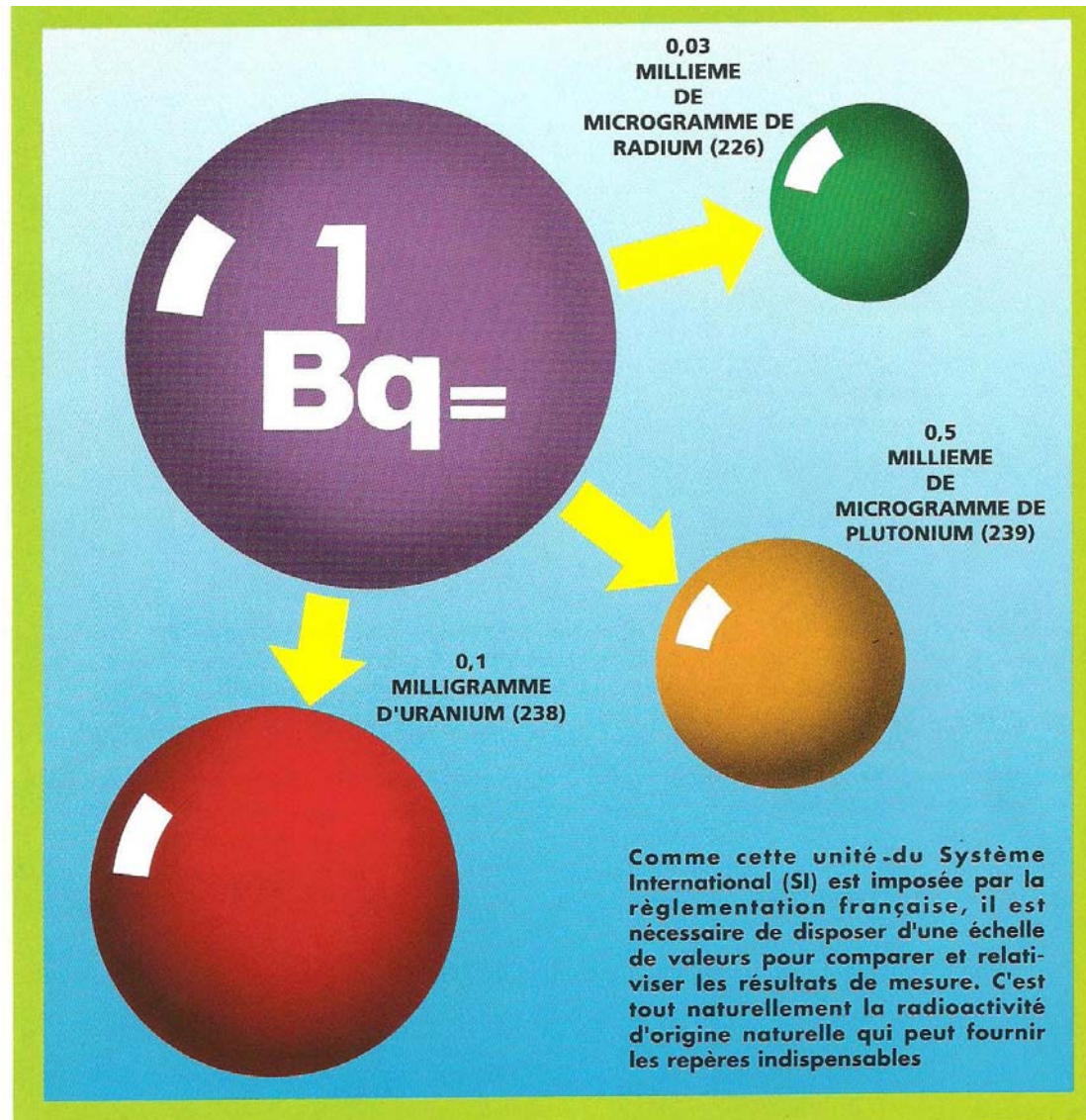
cœur surgénérateur

U8 = uranium 238
Pu = plutonium



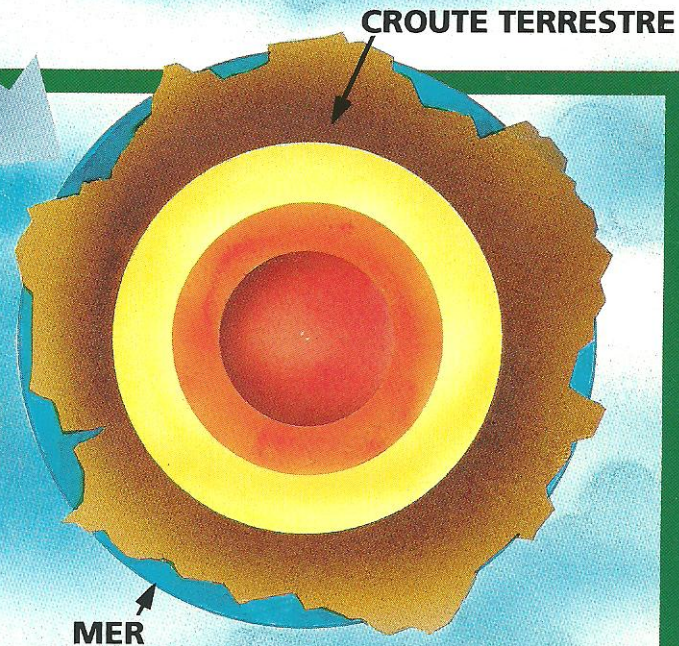
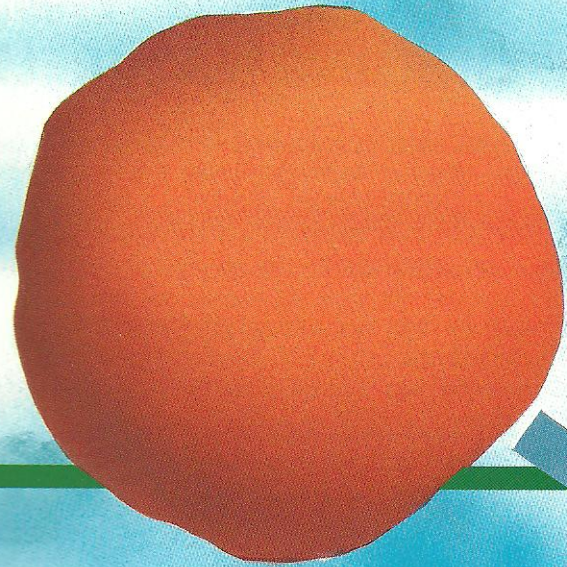
BECQUEREL

ET RADIOACTIVITE D'ORIGINE NATURELLE



Nota : L'ancienne unité était le curie (Ci), 1 Ci = 37.000.000.000 Bq

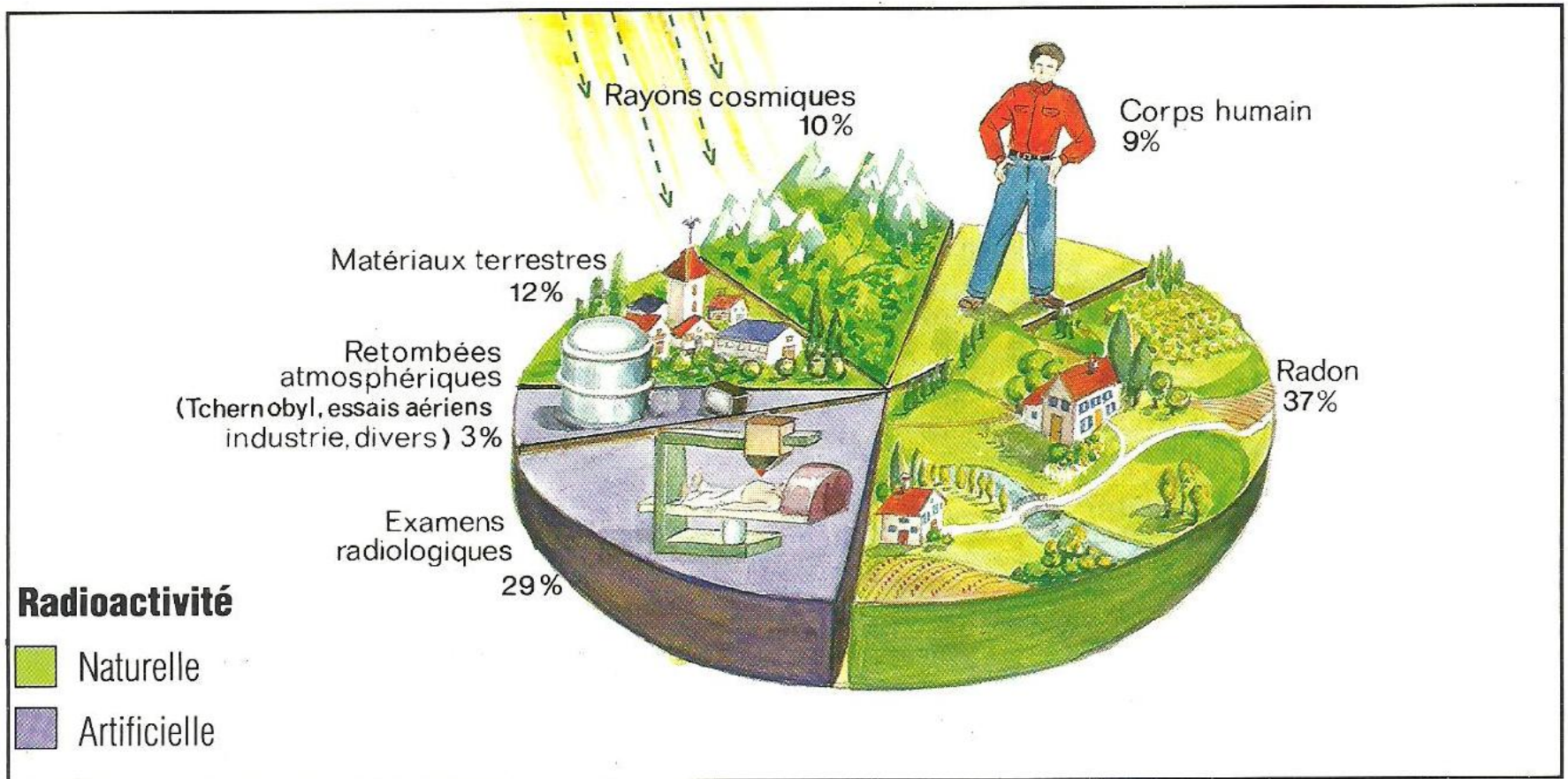
La radioactivité d'origine naturelle du globe terrestre



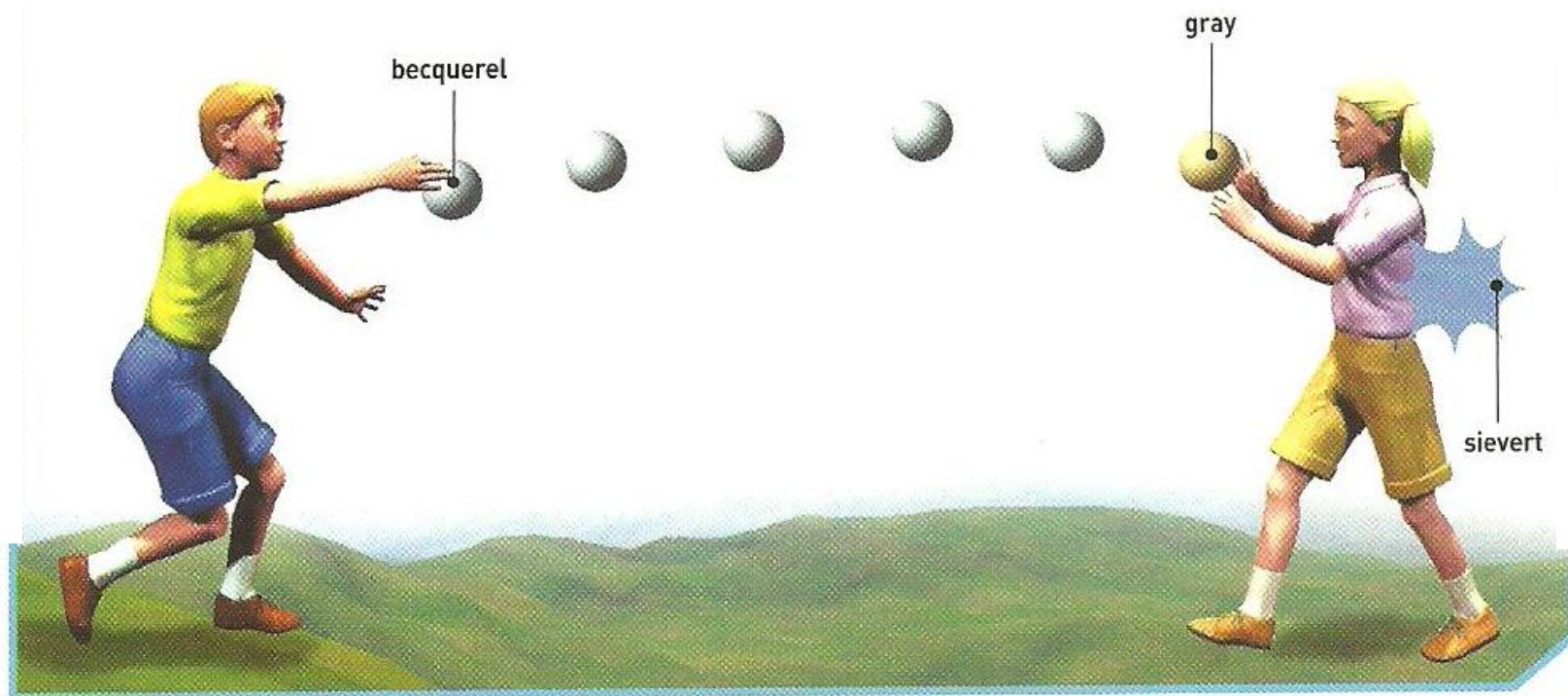
Actuellement après refroidissement
la radioactivité est essentiellement
dans la croûte terrestre superficielle

Analogues
naturels
d' OKLO

Répartition des différentes expositions des populations



Unités de mesure de la radioactivité



Cette image permet de symboliser la relation entre les trois unités de mesure de la radioactivité : un enfant lance des objets en direction d'une camarade. Le nombre d'objets envoyés peut se comparer au **becquerel** (nombre de désintégrations par seconde) ; le nombre d'objets reçu par la camarade, au **gray** (dose absorbée) ; les marques laissées sur son corps selon la nature des objets, lourds ou légers, au **sievert** (effet produit).

Doses reçues

lors d'un examen radiologique

NRD en mGy

Dose effective en mSv

Radio classique

Thorax de face	0,3	0,02
- de profil	1,5	
Mammographie	10	0,7
Crâne face	5	
Rachis lombaire de face	10	1,3
- de profil	30	
Abdomen	10	7

Scanographie

Thorax	20	8
Abdomen	25	10
Encéphale	58	

lors d'une radiothérapie

De l'ordre de 40 à 60 **Gray** (et non pas **Sievert**, car irradiations focalisées) selon les pathologies.

Bombardements Hiroshima – Nagasaki

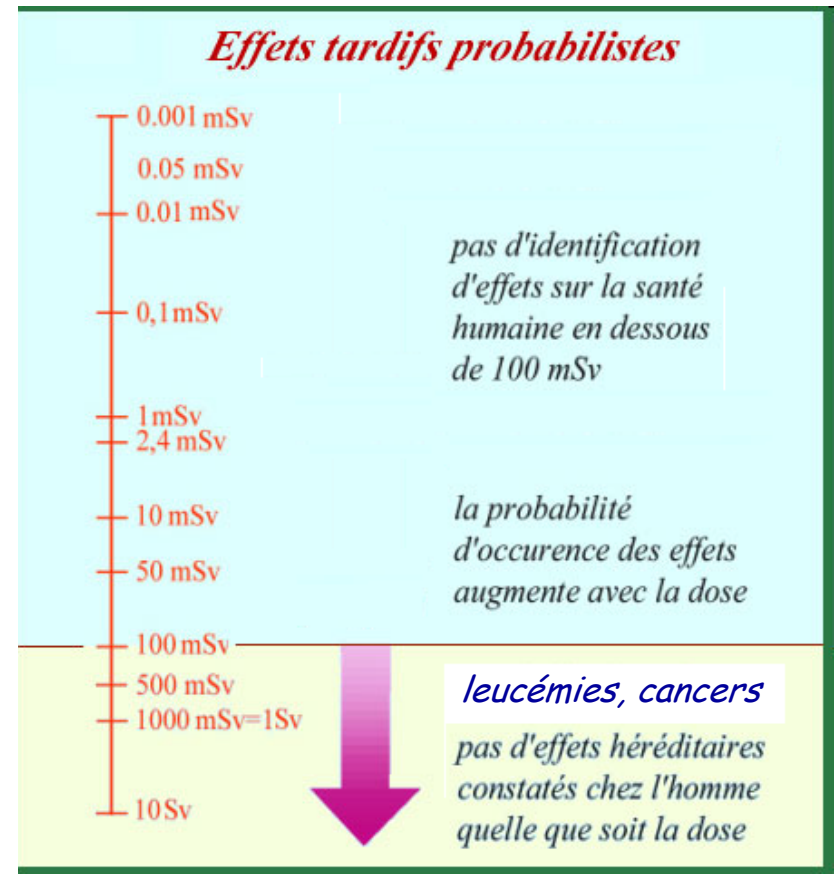
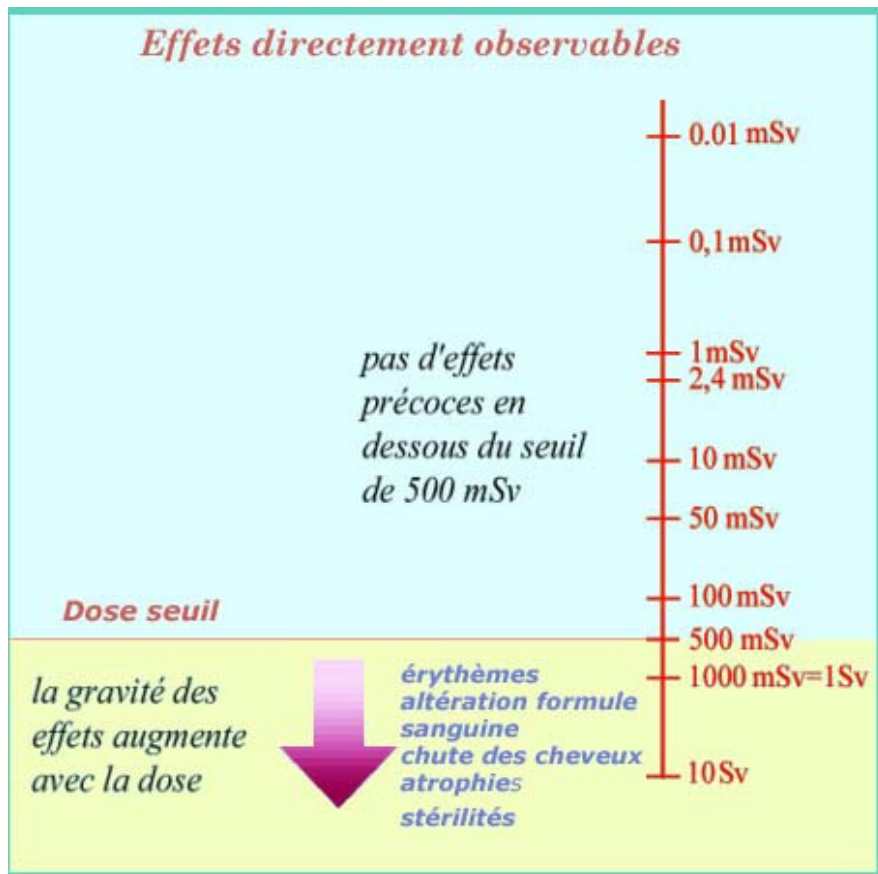
I

6 et 9 août 1945 { population : 580 000
décès : 240 000
 survivants suivis : 120 321

Entre 1950 et 1990	décès constatés cohorte survivants	décès attendus population témoin	excès probabiliste
par cancers solides	7578	7244	334
par leucémies	249	162	87

- Aucun effet héréditaire n'a jamais été observé chez l'homme
- Hormesis (recouvrance)

Bombardements Hiroshima – Nagasaki II



UNSCEAR , CIPR → Normes de radioprotection

- limite travailleurs 100 mSv / 5 ans ou 20 mSv / an
- limite maximale admise en intervention 250 mSv

Accident Three Mile Island (TMI)

28 mars 1979

- perte d'étanchéité circuit primaire
- défaut de refroidissement du cœur
- 45 % cœur fondu dont 20 % au fond cuve
- cuve non percée – circuit confinement intègre

décès : 0

opérateurs de quart (10) : $20 \text{ mSv} < d < 30 \text{ mSv}$

5 avril 1979

- débit dose salle de commande : $0,001 \text{ mSv / h}$
- dose moyenne population :
2000 pers. autour centrale : $0,09 \text{ mSv}$
- sur leur propre initiative 100 000 pers. ont temporairement évacué leur habitation dans la journée

Accident Tchernobyl

26 avril 1986	{	travailleurs	600	
		décès	42	
		fortement irradiés	134	250 mS < d < 600 mSv
avril – mai 1986	{	liquidateurs	600 000	d < 100 mSv
		territoires	dépôt ¹³⁷ Cs	37 kBq / m ²
		population	6 000 000	d < 10 m Sv
		adultes	: pas d'augmentation incidence cancers	
		enfants	: excès probabiliste cancers thyroïdiens	

Accident Fukushima

11 mars 2011	{	opérateurs	800		
		décès	4 (hors nucléaire)		
		$d < 100 \text{ mSv}$	766		
		$100 \text{ mSv} < d < 250 \text{ mSv}$	27		
		$250 \text{ mSv} < d < 580 \text{ mSv}$	3		
15 juin 2011	{	intervenants	3726		
		$d < 100 \text{ mSv}$	3716		
		$250 \text{ mSv} < d < 680 \text{ mSv}$	10		
21 avril 2011		populations	80 000	zone évacuation	8 km
				zone interdite	20 km

Conclusion I

Les quelques éléments de réflexion ainsi présentés indiquent que les progrès technologiques dans les cinquante prochaines années conduiraient à passer du concept d'énergies renouvelables à celui d'énergies alternatives.

A l'aune des 3 critères ASA, rien ne doit être exclu de nos champs d'investigation et d'action, car face aux évolutions démographiques, économiques et sociales il s'agira de s'adapter en permanence aux défis du moment et du lieu considérés.

Mais n'entraînons pas nos compagnons terrestres dans des utopies farfelues et des idéologies mortifères. Les lois physiques de base s'imposent à nous tous de façon implacable.

Aux énergies renouvelables, les consommations individuelles et/ou décentralisées.

Pour répondre aux besoins énergétiques industriels, seul le nucléaire, dans une amélioration constante de ses performances et de sa sécurité, peut contrebalancer les énergies carbonées (charbon, pétrole, gaz ...)

Conclusion II

A titre personnel je pense donc que nos efforts devraient porter sur :

- les économies d'énergie**
- la recherche fondamentale et appliquée pour le stockage**
- l'approfondissement de nos connaissances en radiobiologie**
- le maintien en condition de notre parc nucléaire :
construction de 1 à 2 EPR par an à partir de 2016**
- le développement des réacteurs de génération IV :
prototype industriel, puis développement réacteurs à neutrons rapides**
- la fusion nucléaire**