

Les enjeux énergétiques du 21^{ème} siècle

Paul-Henri Heenen
Université Libre de Bruxelles

Sommaire

- Avant propos physique: ordres de grandeur
échelles
contraintes
- Le nucléaire: quelques propriétés du noyau
fusion-fission
- La fusion: comment cela fonctionne(ra), avantages
- La fission: principe, réalisation, vrais et faux problèmes
- Quelques autres applications du nucléaire
- Eolien, solaire: où en est-on, jusqu'où peut-on aller à moyen terme
- Bilan général du cours

Les énergies du 21ème siècle

L'énergie

- ✓ Un besoin vital dans tous les compartiments de notre vie habitat, transports, productions industrielle et agricole, santé, ...
- ✓ Une question de société
 - Choix nécessaires entre divers modes de production
 - Compte tenu des avantages
 - Compte tenu des inconvénients

La recherche peut-elle permettre ?

- ✓ De réduire les inconvénients
- ✓ De proposer de meilleures solutions

Repères historiques

- **Energies mécaniques (cinétique, potentielle, travail)** 1665 - 1840
- **Energies calorifique et chimique** 1780 - 1840
- **Deuxième principe** 1824
- **Premier principe** 1840 - 1850
- **Energies électromagnétiques** 1840 - 1890
- **Processus irréversibles** 1810 - 1930
- **Théorie cinétique** 1860 - 1910
- **Rayonnement** 1890 - 1920
- **Microphysique, énergie nucléaire** 1880 - ...

Principes fondamentaux

- ***Premier principe : conservation***
Energies latentes, transferts, transformations
- ***Deuxième principe : dégradation***
Rendement maximal
- ***Thermodynamique hors équilibre***
Rendement effectif
- ***Hiérarchie des interactions entre particules élémentaires***

Unités d'énergie

Joule (J)

- 1 kg lancé à 1m/s = 0,5 J

- 1 kg chutant de 1m = 9,8 J

Kilowatt - heure

- 1kWh = $3,6 \times 10^6$ J

Tonne d'équivalent pétrole

- 1tep = 11 MWh (thermique)

Kilocalorie (ou Calorie)

- 1kcal = 4,18 kJ = 1,2 Wh

- 1 kg d'eau chauffé de 1°

Electron - volt

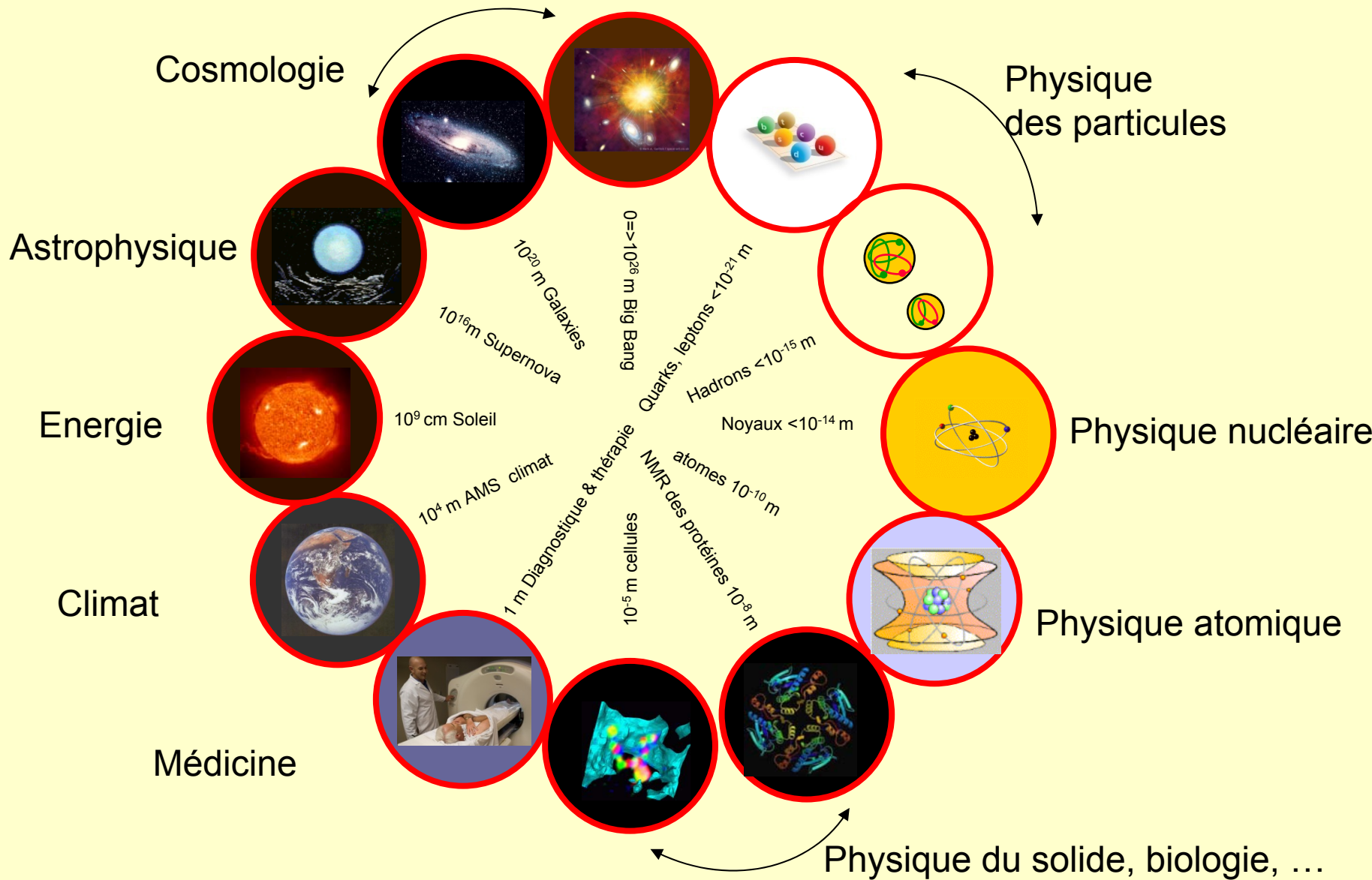
- 1eV = $1,6 \times 10^{-19}$ J

Unités de puissance

Watt - 1 W = 1J/s

Kilowatt 1 kW	= 10 ³ W	Réchaud
Mégawatt 1 MW	= 10 ⁶ W	Eolienne
Gigawatt 1 GW	= 10 ⁹ W	Centrale
Térawatt 1 TW	= 10 ¹² W	

Le coeur de la matière



Les quatre interactions fondamentales

- **Forte:** 1 à 10 MeV ; portée 1 fm = 10^{-15} m
 - fusion, fission nucléaire
- **Electromagnétique:** 0,1 à 5 eV ; distances 0,1 nm = 10^{-10} m (mais portée infinie)
 - Piles : 1 à 3V
 - Rayonnement : photon jaune 2 eV
 - Chimie : liaison des molécules
 - Thermiques : liaison des solides, chaleur spécifique
- **Faible:** processus peu probables: 10^{-2} plus faible que la force électromagnétique
 - portée 10^{-18} m
 - Radioactivité β ; H+H dans le soleil
- **Gravitationnelle:** 10^{-36} fois plus faible pour deux protons que la force de Coulomb
 - Poids
 - Energie cinétique

Les énergies

Différentes sources d'énergie disponibles dans la nature: énergies primaires

- ✓ charbon, pétrole, gaz
- ✓ noyaux fissiles, fertiles, fusibles
- ✓ bois
- ✓ vent, eau, rayonnement solaire

Energies primaires → énergies finales

{
calorifique
mécanique
électrique

Unités

- Physique: le **joule**
- Particulier: le **kWh** (1 kWh est la quantité d'énergie nécessaire pour faire fonctionner un appareil d'une puissance de 1 kW pendant 1 heure)
ex: chaque Belge consomme en moyenne 7000 kWh/an d'électricité
- Pour comparaison: la **tep** (tonne équivalent pétrole) quantité d'énergie obtenue sous forme de chaleur par la combustion d'une tonne de pétrole
1 tep=11600 kWh

Equivalences de différentes énergies primaires



1 tonne de pétrole



1,7 tonnes de charbon



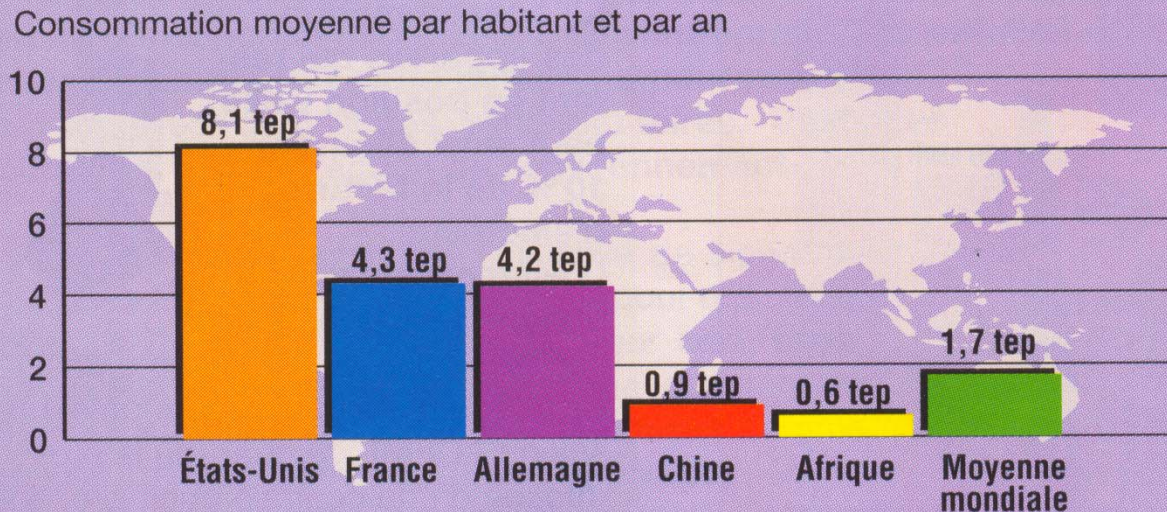
3,3 tonnes de bois



0,5 gramme de matière fissile

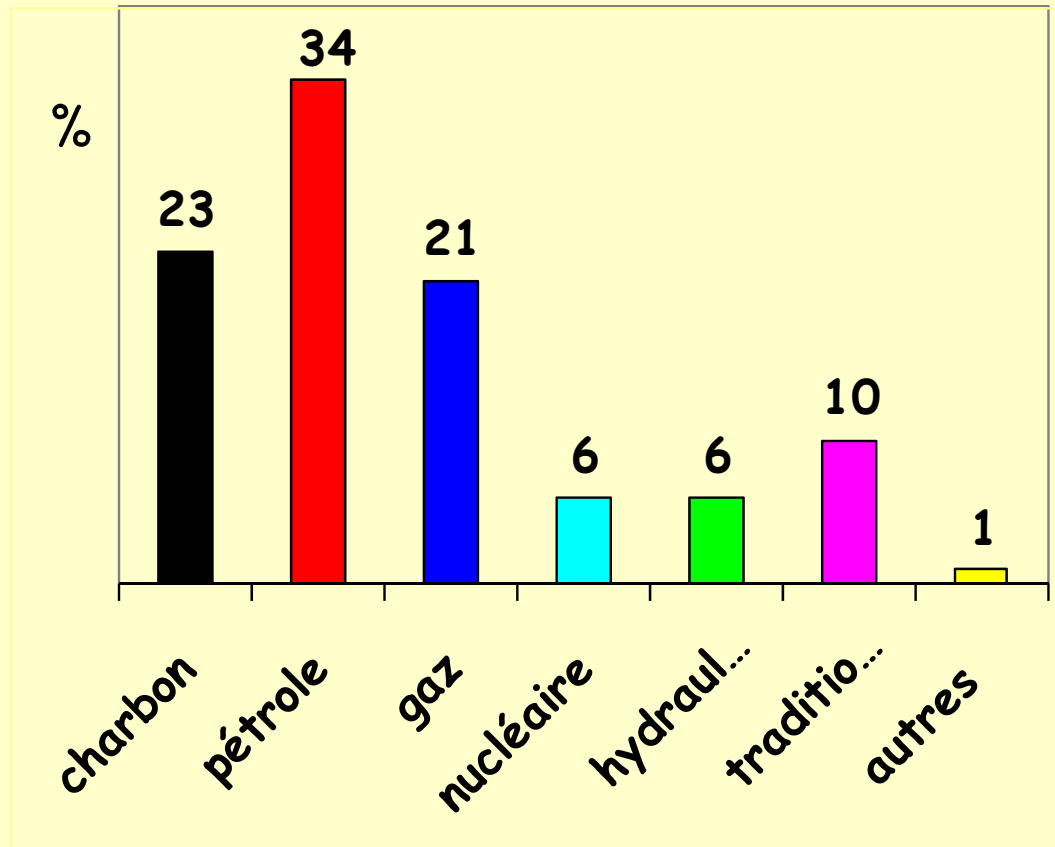
Consommation d'énergie de l'humanité: environ 10 milliards de tep (10 Gtep)

Les 29 pays industrialisés membres de l'OCDE consomment 5 100 Mtep par an d'énergie primaire, alors que le reste du monde ne consomme que 4 600 Mtep.



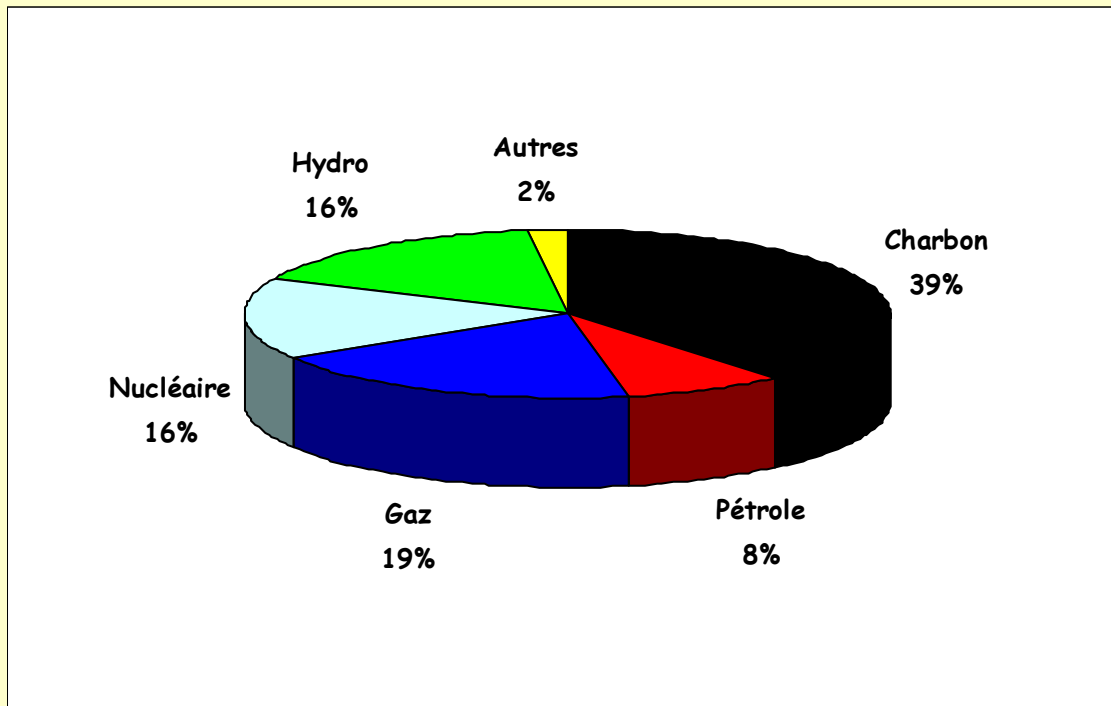
Près de deux milliards de personnes sur Terre, soit un tiers de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à une quelconque forme d'énergie autre que la biomasse traditionnelle, essentiellement le bois.

Consommations d'énergies primaires au niveau mondial



Consommation totale 10 Gtep
80% d'origine fossile
85% non renouvelable

Bouquet énergétique électrique mondial



Consommation mondiale annuelle d'électricité : 16050 TWh. Ceci correspond à 30% de l'énergie primaire globale consommée 10 Gtep

Energies renouvelables

- Ressources inépuisables à notre échelle (soleil, vent) ou ressources renouvelables en un temps court (bois par exemple)

Le solaire
L'éolien
L'hydraulique



Le Nucléaire

Quelques repères

Energie Nucléaire: un peu d'histoire

1896 : H. Becquerel, à la suite de la découverte des rayons X par W. Roentgen, établit que l'uranium émet un rayonnement pénétrant

1897 : J.J. Thomson identifie l'électron en mesurant sa masse et sa charge.

1898 : P. et M. Curie découvrent le polonium et le radium, particulièrement « actifs » en ce qui concerne l'émission de rayonnement. Ils créent le terme de « radioactivité ».

1899 : identification des rayonnements α et β par E. Rutherford

1890 : P. Villard met en évidence le rayonnement γ .

1902-1903 : E. Rutherford et F. Soddy découvrent la loi des transformations radioactives : la radioactivité (α ou β) est la transmutation spontanée d'un élément en un autre par émission de rayonnement.

1903 : H. Becquerel et P. et M. Curie reçoivent le prix Nobel de Physique

(Marie Curie recevra le Prix Nobel de Chimie en 1911)

1906-1907 : A. Einstein établit $E = mc^2$

1909 : E. Rutherford établit que la particule α est un noyau d'He

1911 : E. Rutherford : un noyau occupe le centre de l'atome

1913 : F. Soddy et G. Hevesy mettent en évidence les isotopes

1932 : découverte du neutron par J. Chadwick, le noyau est un assemblage de protons et de neutrons

1934 : Découverte de la radioactivité artificielle, à Paris, par Frédéric Joliot et Irène Curie. En bombardant une feuille d'aluminium avec des particules alpha, ils obtiennent du phosphore radioactif

- 1939 : découverte de la fission par O. Hahn, F. Strassmann et L.Meitner.
- 1940 : premières synthèses d'isotopes d'éléments transuraniens.
- 1942 : isolement à Chicago de 0,25 mg de plutonium par G.T.Seaborg, mise en fonctionnement de la 1ère pile atomique par E.Fermi.
- 1945 : Bombes sur Hiroshima et Nagasaki
- 1946 : premières piles atomiques au Canada et en Angleterre
- 1948 : première pile atomique française : Zoé
- 1958 : première production d'électricité nucléaire en France à Marcoule
- 1963 : première production d'électricité nucléaire industrielle à Chinon
- 1967 : Mise en production à Pierrelatte de l'usine d'enrichissement isotopique de l'uranium par diffusion gazeuse.
- 1970 : apparition des REP en France (U enrichi)
- 1972 : Découverte à Oklo, au Gabon, d'un réacteur naturel fossile.

Noyau : assemblage stable ou instable (radioactif) de nucléons

Nucléon : constituant du noyau : proton, neutron

Élément : définition chimique : caractérisé par son Z : numéro atomique, = Nombre de proton du noyau ou d'électrons de l'atome

Nbre de Masse A : somme des Nombres de protons et de neutrons dans un noyau

Periodic Table of the Elements:

1																	18			
1 H	2										13	14	15	16	17	2 He				
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne			
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar			
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr			
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe			
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs					112 Cp								
								109 Mt	110 Ds	111 Rg					113	114	115	116		

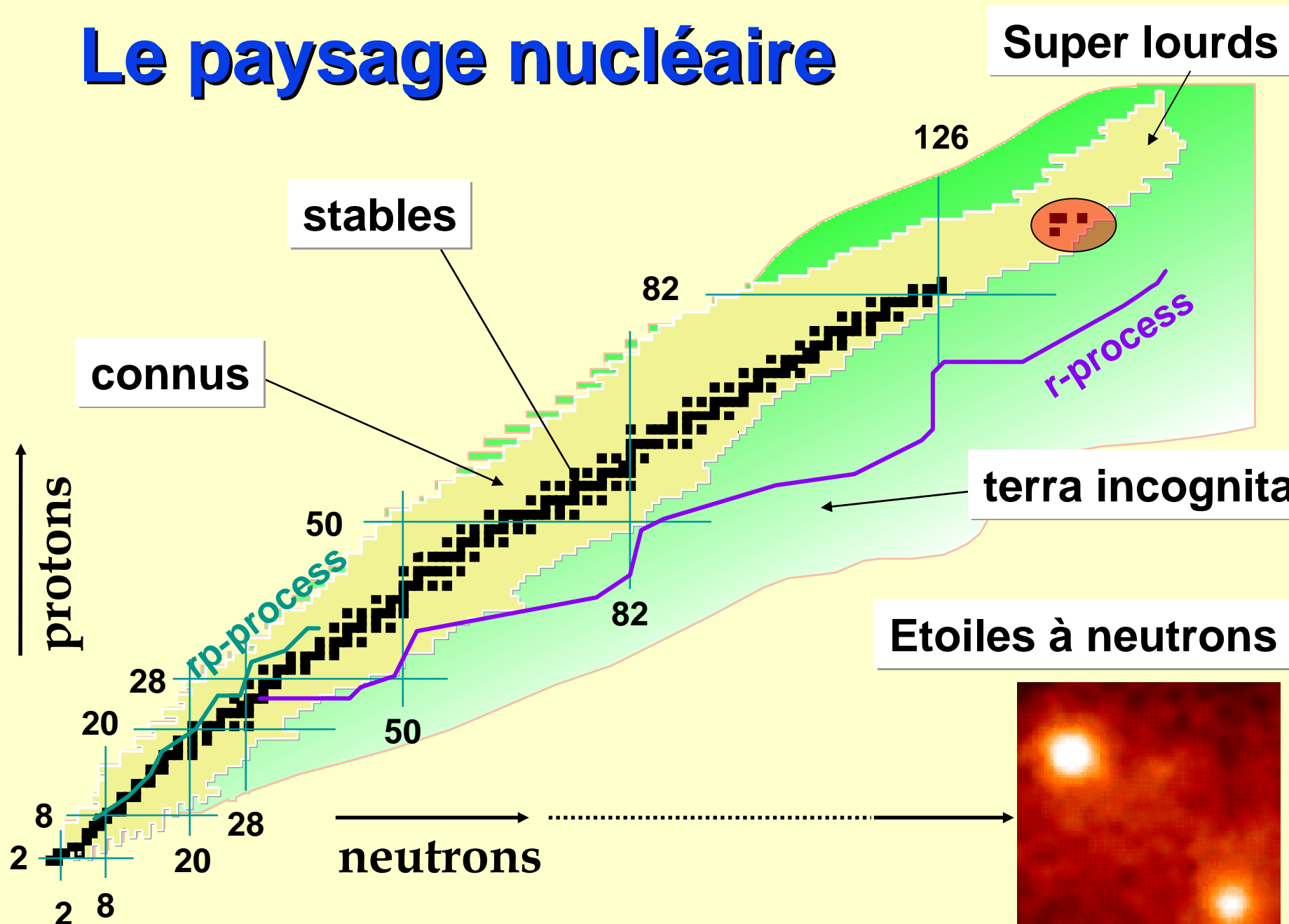
Lanthanides

Actinides

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

(courtesy of A. Türler, H. Gäggeler, M. Schädel et al.)

Le paysage nucléaire



Radioactivité

P. et M. Curie 1898

Modification **SPONTANEE** de la structure interne de certains noyaux atteindre un niveau d'énergie interne plus faible.

Cette transformation s'accompagne de l'émission de particules et/ou de rayons électromagnétiques γ .

Cette désintégration est purement aléatoire

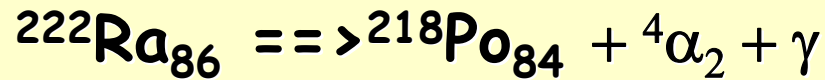
(probabilité sans effet de mémoire).

On ne peut donc donner qu'une probabilité de désintégration par unité de temps = « constante radioactive ».

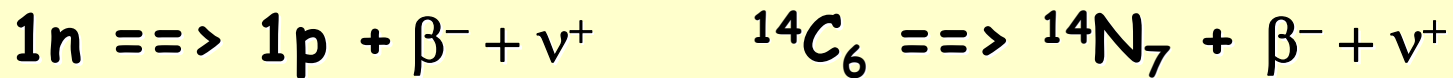
$$\lambda = s^{-1}$$

3 types principaux : α , β , γ

α : émission d'un noyau d' ${}^4\text{He}$



β : - ou + émission de e^- ou e^+ (ν^+ , ν^-)



($1p \implies 1n + \beta^+ + \nu^-$ dans un noyau uniquement!)

γ : émission rayonnement électromagnétique

Environ 300 noyaux stables

Durée de vie d'un noyau instable: entre la fraction de μs
et 10^{25} ans !

$N(t)$: quantité d'un isotope radioactif au temps t

Nombre de noyaux se désintégrant au temps dt est proportionnel à $N(t)$: $\lambda \cdot N(t) dt$

$N(t)$ diminue donc de $-\lambda \cdot N(t) dt$

$$dN = -\lambda \cdot N dt$$

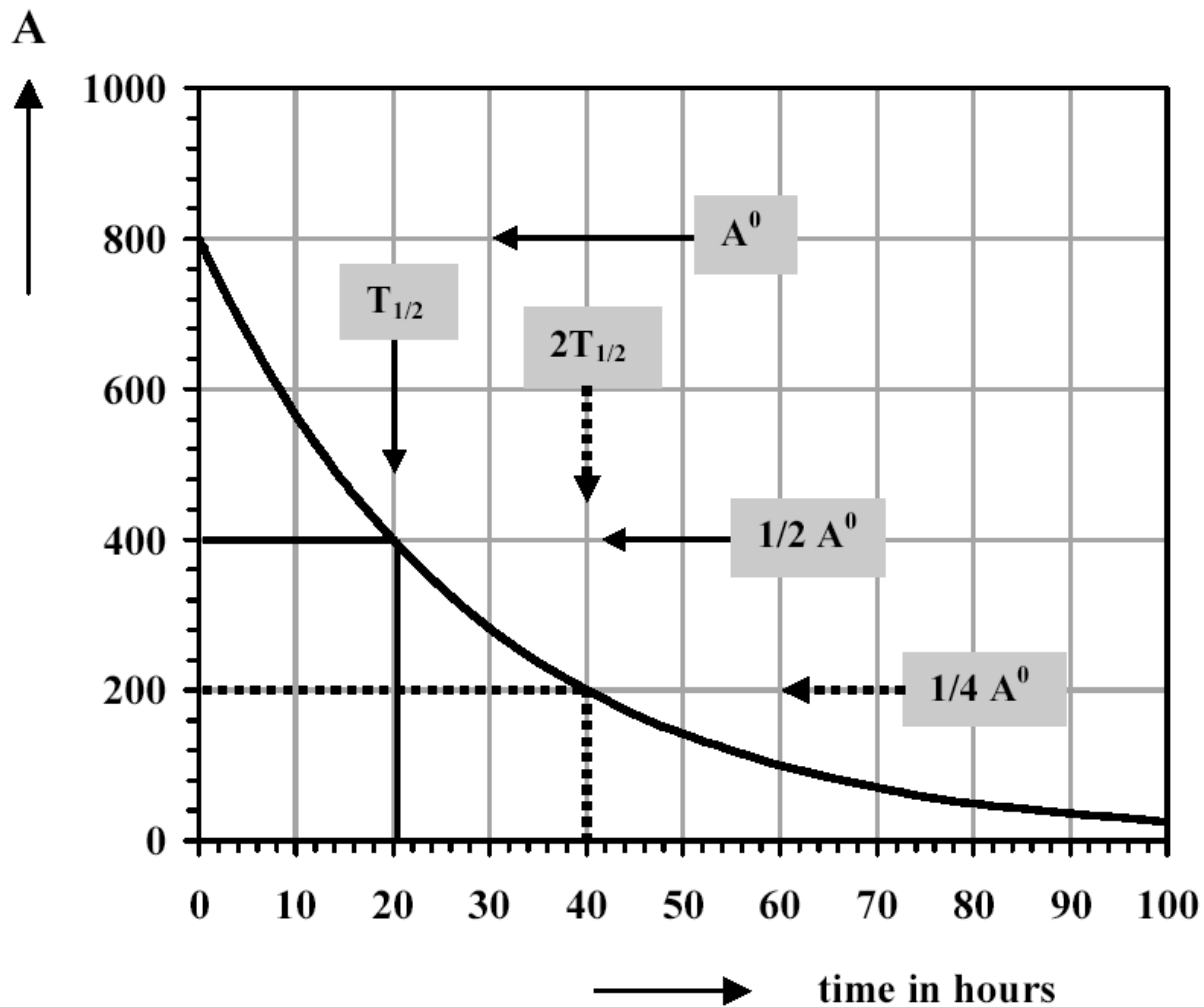
Solution est une exponentielle décroissante:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad N_0 = N(t=0)$$

$N(t)$ est le nombre le plus probable d'isotopes radioactifs restant au temps t

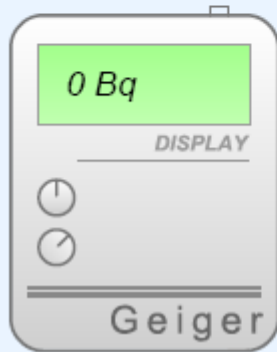
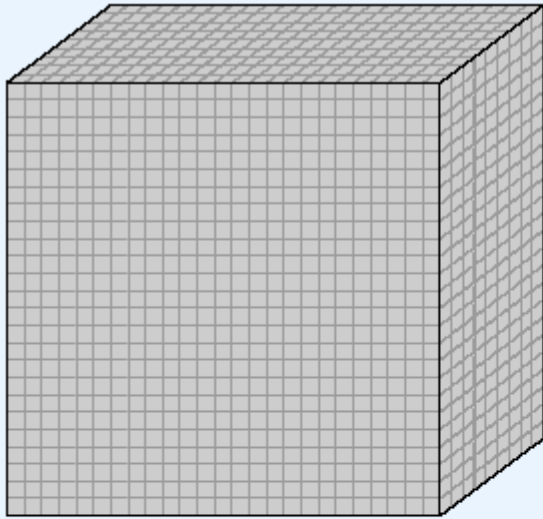
$T_{1/2}$ = période ou demi-vie

= temps moyen nécessaire pour que 50% des isotopes soient désintégrés $T_{1/2} = \ln(2)/\lambda$

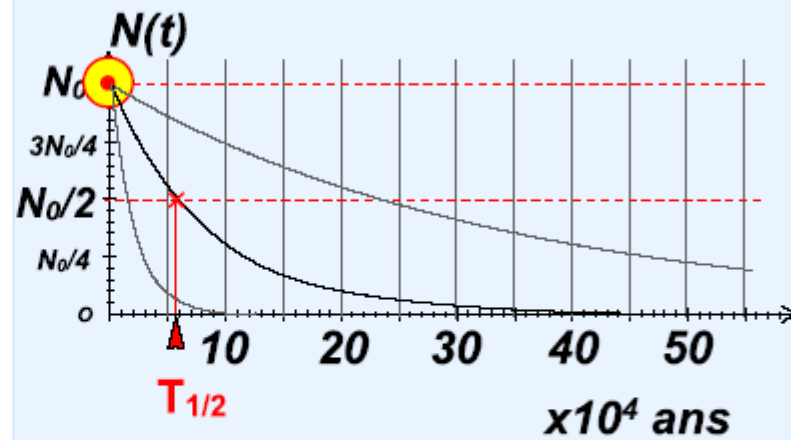


The rate of radioactive decay. After each subsequent half-life of 20 hours the number of radioactive nuclei and the original radioactivity of 800 units are divided into half.

$$T_{1/2} = 20h$$



N_0 atomes de Carbone 14



- ^{226}Ra . $T_{1/2} = 1600$ ans
- ^{14}C . $T_{1/2} = 5730$ ans
- ^{239}Pu . $T_{1/2} = 24000$ ans