

L'énergie nucléaire : une introduction

- 1- Energie et puissance
transformations de l'énergie,
unités, quantités, besoins...
- 2- Atomes et noyaux
physique et chimie de la matière
d'où vient l'énergie nucléaire ?
- 3- Progrès scientifiques et applications
grandes découvertes : 1896-1942
le nucléaire au 20e siècle

Partie 1. L'énergie

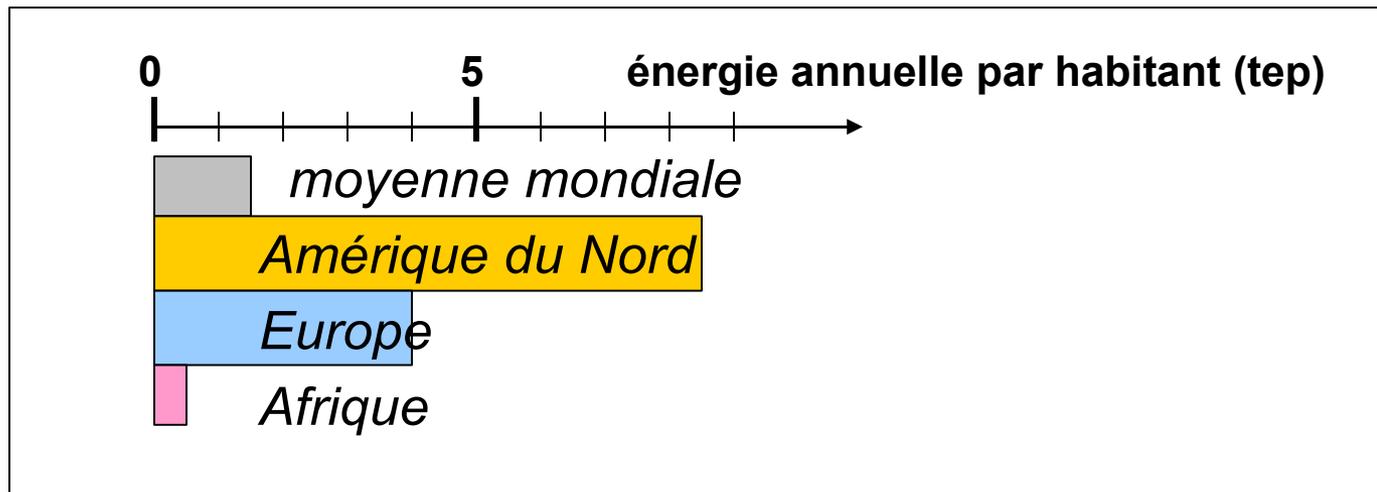
L'énergie est **naturelle** dans l'univers : mouvement, chaleur, lumière

big-bang \Rightarrow matière H, He \Rightarrow étoiles C, Fe \Rightarrow soleil
et planètes

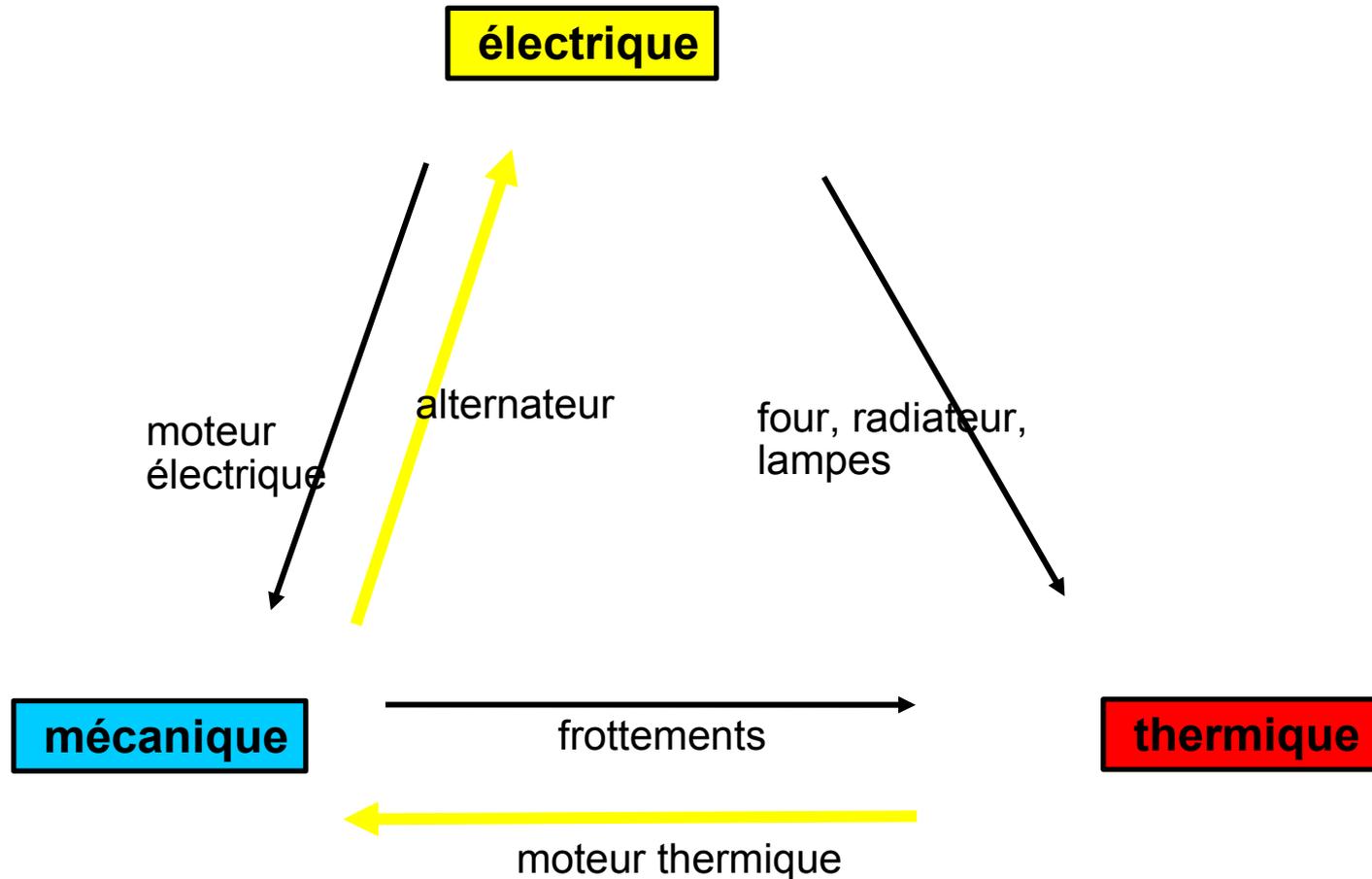
L'énergie est nécessaire aux **êtres vivants** : mobilité, chauffage, nourriture

Les **besoins humains** augmentent avec les développements technologiques
industries, transports, chimie, robotique, informatique, spatial...

Exemple de sur-consommation des sociétés industrialisées



Principales transformations de l'énergie

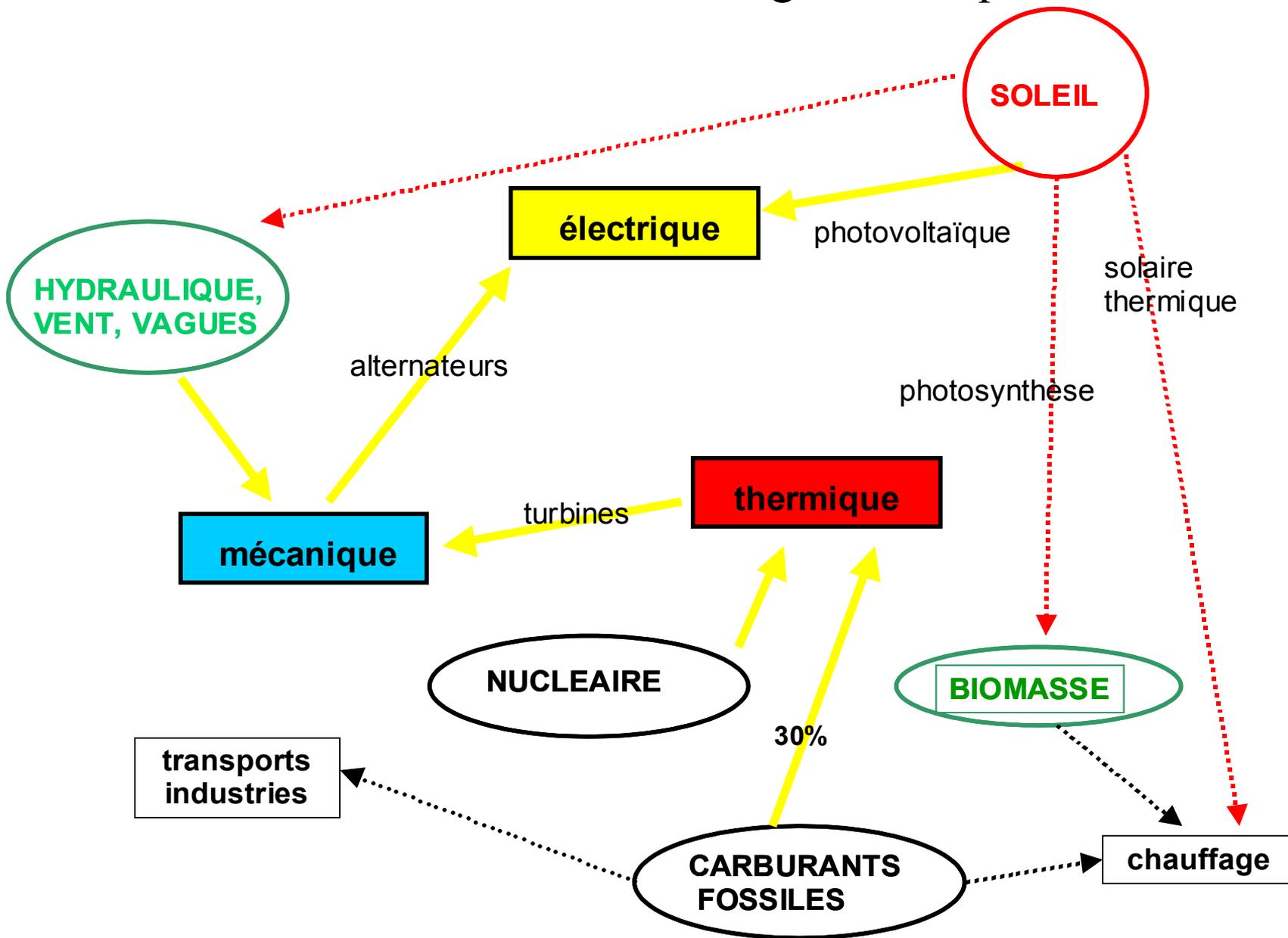


Lois de la thermodynamique :

premier principe : conservation de l'énergie totale

deuxième principe : évolution vers l'augmentation d'entropie

Production d'énergie électrique



Puissance

La **puissance** (Watt) est un **débit d'énergie**

exemples :

affichage LCD	0,01 W	(10 mW)
four	3000 W	(3 kW)
moteur de TGV	1 100 000 W	(1,1 MW)
centrale électrique	800 000 000 W	(800 MW = 0,8 GW)

Consommation **moyenne mondiale par habitant** : environ 300 W

EDF mesure l'énergie électrique en **kWh**

tarif : 0,1312 € HT par kWh (HP) + abonnement (10 à 20 € par mois)

exemple : une heure de cuisson au four (3 kW) : 3 kWh

un jour de chauffage électrique (6 kW) : 144 kWh

Unités

Système International : m kg s A
distance en **mètre**
masse en **kilogramme**
temps en **seconde**
courant en **Ampère**

Unité légales : énergie en **Joule**

puissance en **Watt= Joule/seconde**

Unité usuelles : énergie en **kWh, tep**

puissance en **kW, MW, GW**

1 kW ==> 8766 kWh par an

**tep = « tonne équivalent pétrole »
= 11700 kWh**

1 Mtep = 11,7 TWh

Unités spéciales : énergie en **calories, électron-volt (eV)**

puissance en **cheval-vapeur**

L'électricité en France

Pendant l'année 2010:

(source EDF)

énergie électrique consommée ==> **490 TWh**
~ 16% de la consommation **totale** (énergie **primaire**)

puissance électrique moyenne ==> **56 GW** (490 TWh / 8760 heures)
pics ==> **90 GW**

Consommation d'électricité par habitant (population : 65 millions)
énergie électrique annuelle : **6770 kWh** **dont environ la moitié à domicile**
puissance moyenne : **770 W**

Production ~ 600 TWh *

Origine en pourcentages ** :

81,0 % nucléaire
8,0 % charbon, pétrole et gaz
7,9 % hydraulique
2,8 % éolien et solaire
0,3 % autres

Consommation 490 TWh

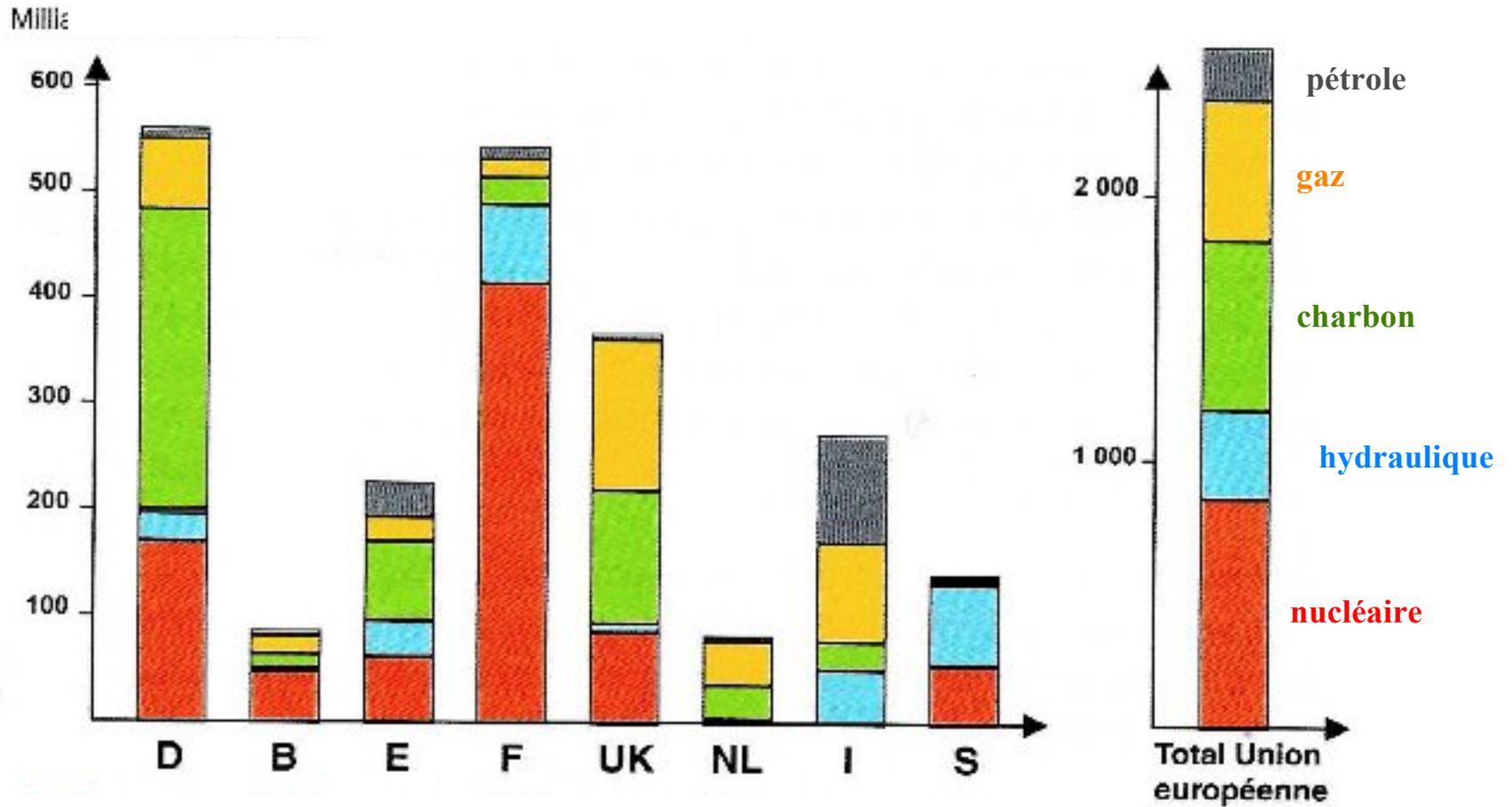
65,4 % habitat - tertiaire
30,1 % industrie
2,9 % transports
1,6 % agriculture

* **600 Twh** dont **~80 TWh** exportation vers **Italie, Allemagne...**
et **~30 TWh** auto-consommation et transport

** **voir votre facture EDF...**

L'électricité en Europe

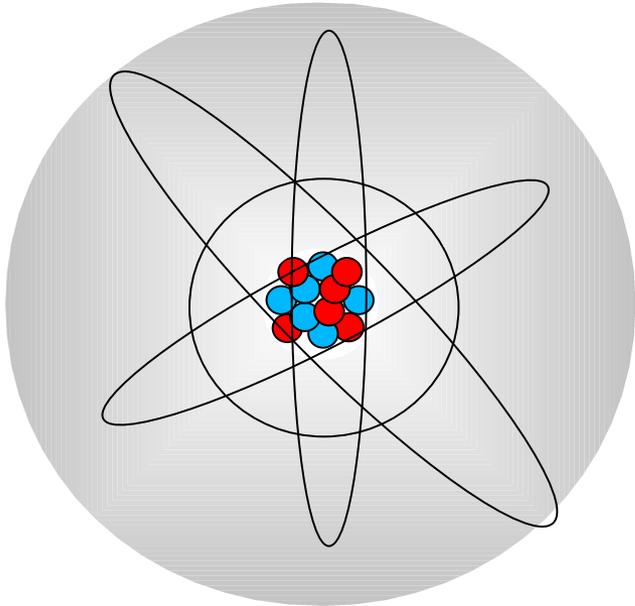
comparaison des sources d'énergie électrique, en TWh (bruts), année 2000



source : cours ECL, D. Hertz

Partie 2. Atome, électrons et noyau

exemple : atome de carbone, numéro atomique $Z=6$



6 électrons



interaction électrique $\sim eV$

6 protons



6 neutrons



noyau

isotopes

ou 8

$A = 12$ ou 14 nucléons

^{12}C ou ^{14}C

interaction FORTE $\sim 1\,000\,000\ eV = 1\ MeV$

quelques éléments atomiques

carbone C numéro atomique $Z=6$
isotope majoritaire ^{12}C masse atomique $A=12$
autres ^{14}C ^{13}C

hydrogène H numéro atomique $Z=1$
isotope majoritaire ^1H masse atomique $A=1$
autres isotopes ^2H (deuterium) ^3H (tritium)

uranium U numéro atomique $Z=92$
isotope majoritaire ^{238}U masse atomique $A=238$
autres isotopes ^{235}U ^{233}U

notation complète : $^{12}_6\text{C}$ $^{238}_{92}\text{U}$

Tableau périodique des éléments classification de Mendeleïev (1834-1907)

1																	2																																																				
1	H 1.003																	He 4.003																																																			
2	3	4													5	6	7	8	9	10																																																	
	Li 6.940	Be 9.013													B 10.82	C 12.011	N 14.008	O 15.999	F 19.00	Ne 20.183																																																	
3	11	12													13	14	15	16	17	18																																																	
	Na 22.991	Mg 24.32													Al 26.98	Si 28.09	P 30.975	S 32.06	Cl 35.457	Ar 39.944																																																	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																			
	K 39.100	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.90	V 50.95	Cr 52.01	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.94	Ni 58.71	Cu 63.54	Zn 65.38	Ga 69.72	Ge 72.60	As 74.91	Se 78.96	Br 79.916	Kr 83.80																																																			
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																			
	Rb 85.48	Sr 87.63	Y 88.92	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.95	Tc (99)	Ru 101.1	Rh 102.91	Pd 106.4	Ag 107.88	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.70	Sb 121.76	Te 127.61	I 126.91	Xe 131.30																																																			
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																																			
	Cs 132.91	Ba 137.36	La 138.92	Hf 178.50	Ta 180.95	W 183.86	Re 186.22	Os 190.2	Ir 192.2	Pt 195.09	Au 197.0	Hg 200.61	Tl 204.39	Pb 207.21	Bi 208.9	Po (209)	At (210)	Rn (222)																																																			
7	87	88	89	90	91	92																																																															
	Fr (223)	Ra 226.03	Ac 227.0	Th 232.04	Pa (231)	U 238.07																																																															
				<table border="1"> <tbody> <tr> <td>58</td> <td>59</td> <td>60</td> <td>61</td> <td>62</td> <td>63</td> <td>64</td> <td>65</td> <td>66</td> <td>67</td> <td>68</td> <td>69</td> <td>70</td> </tr> <tr> <td>Ce 140.13</td> <td>Pr 140.92</td> <td>Nd 144.27</td> <td>Pm (145)</td> <td>Sm 150.35</td> <td>Eu 152.35</td> <td>Gd 157.26</td> <td>Tb 158.93</td> <td>Dy 162.51</td> <td>Ho 164.94</td> <td>Er 167.2</td> <td>Tm 168.94</td> <td>Yb 173.04</td> </tr> <tr> <td>93</td> <td>94</td> <td>95</td> <td>96</td> <td>97</td> <td>98</td> <td>99</td> <td>100</td> <td>101</td> <td>102</td> <td>103</td> <td>104</td> <td>105</td> </tr> <tr> <td>Np (237)</td> <td>Pu (242)</td> <td>Am (243)</td> <td>Cm (245)</td> <td>Bk (249)</td> <td>Cf (251)</td> <td>Es (254)</td> <td>Fm (255)</td> <td>Md (256)</td> <td>No (259)</td> <td>Lr (260)</td> <td>Ku</td> <td>Ha</td> </tr> </tbody> </table>														58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	Ce 140.13	Pr 140.92	Nd 144.27	Pm (145)	Sm 150.35	Eu 152.35	Gd 157.26	Tb 158.93	Dy 162.51	Ho 164.94	Er 167.2	Tm 168.94	Yb 173.04	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	Np (237)	Pu (242)	Am (243)	Cm (245)	Bk (249)	Cf (251)	Es (254)	Fm (255)	Md (256)	No (259)	Lr (260)	Ku	Ha
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70																																																									
Ce 140.13	Pr 140.92	Nd 144.27	Pm (145)	Sm 150.35	Eu 152.35	Gd 157.26	Tb 158.93	Dy 162.51	Ho 164.94	Er 167.2	Tm 168.94	Yb 173.04																																																									
93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105																																																									
Np (237)	Pu (242)	Am (243)	Cm (245)	Bk (249)	Cf (251)	Es (254)	Fm (255)	Md (256)	No (259)	Lr (260)	Ku	Ha																																																									

- hydrogène
- métaux
- « métalloïdes »
- non-métaux
- gaz rares
- radioactif

Radioactivité

un noyau **radioactif** se modifie spontanément

avec une probabilité 1/2 pendant une durée caractéristique $t_{1/2}$ ==> *période ou demi-vie*

émission de différents types de rayonnements :

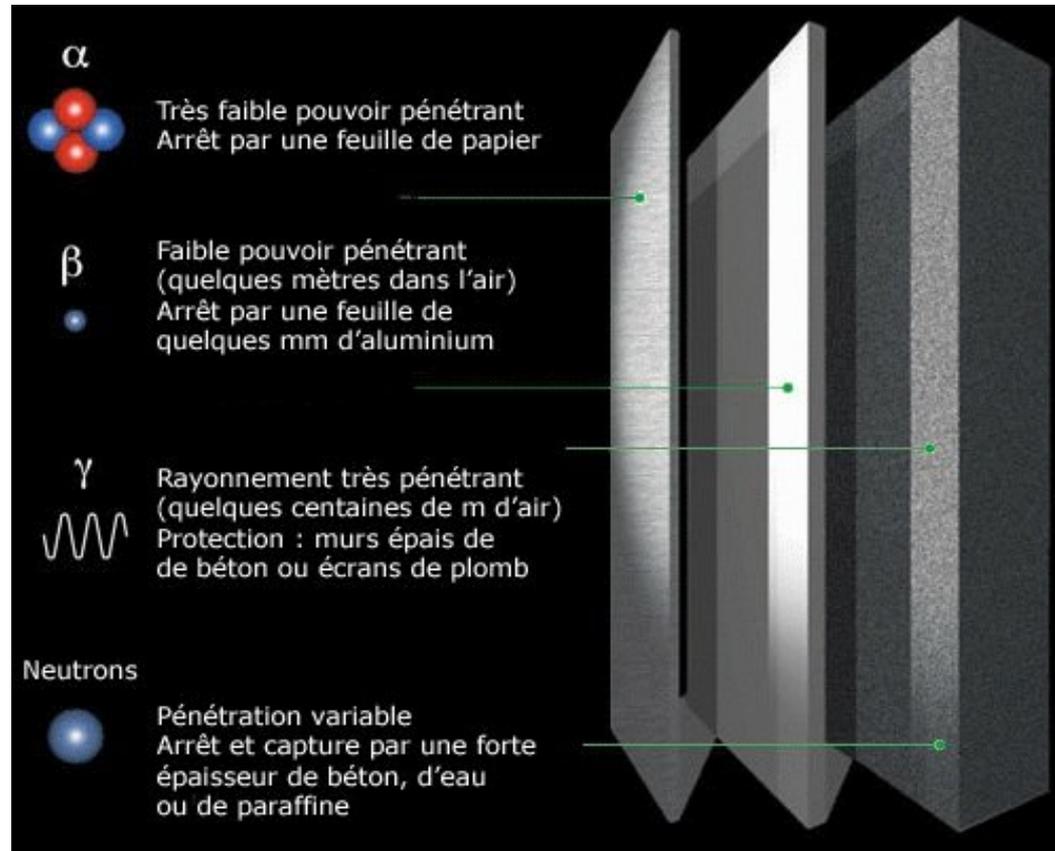
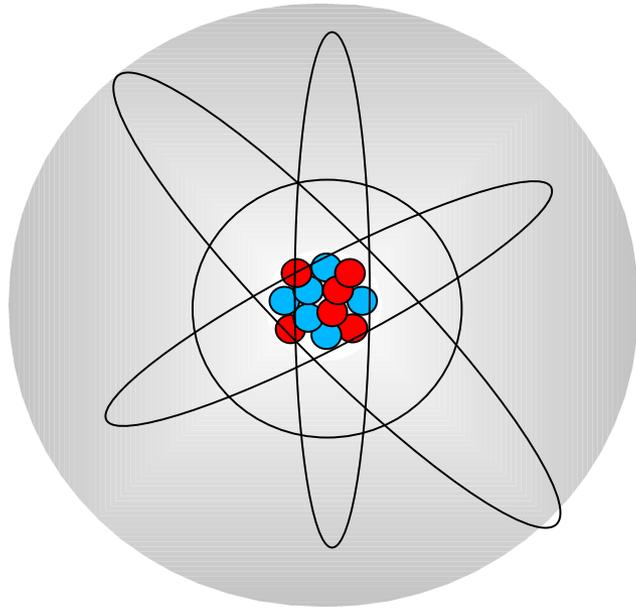


fig. N. Moncoffre

Dimensions



←-----→
 atome ~ 0,1 nanomètre (1nm= 10⁻⁹ m)

←-----→
 noyau ~ 1 femtomètre (1fm=10⁻¹⁵ m)

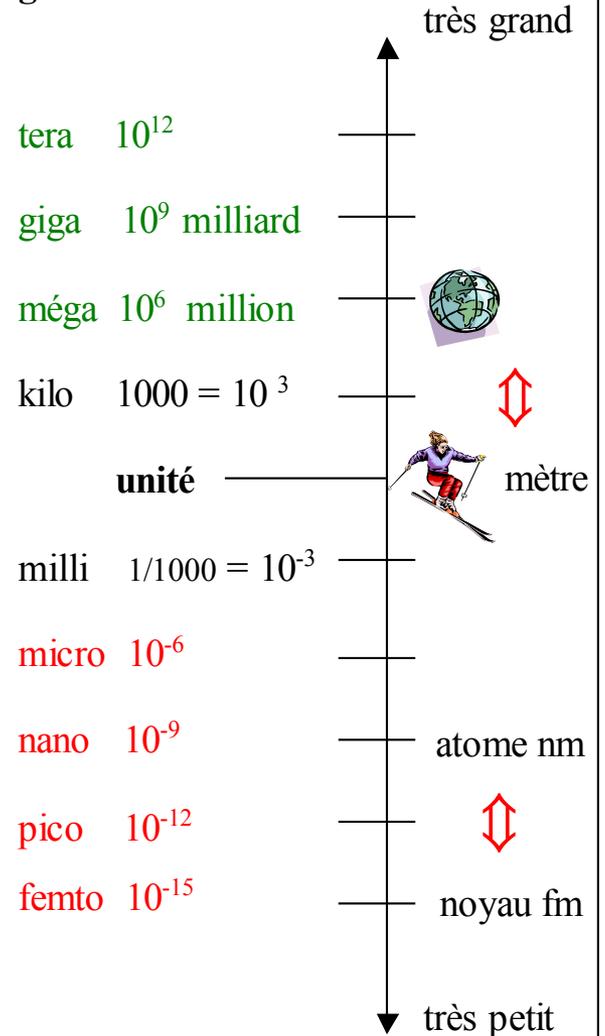
différence d'échelle 1 / 100 000

le noyau (et la masse) dans l'atome



une orange dans le Grand Lyon

grandeurs et suffixes :

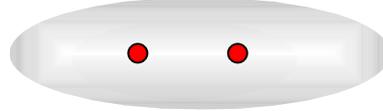


Molécules : assemblage d'atomes

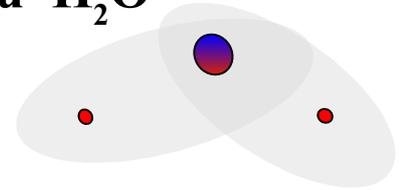
molécules simples

ex. 2 ou 3 atomes

hydrogène H₂



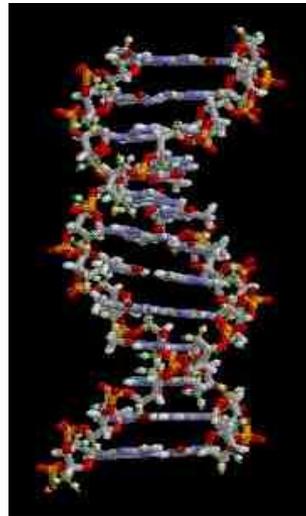
eau H₂O



molécule complexes

exemple : ADN

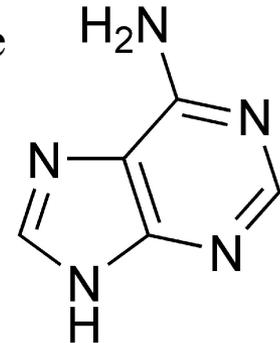
(fig. wikipedia)



4 bases : ATGC

ex. A adénine

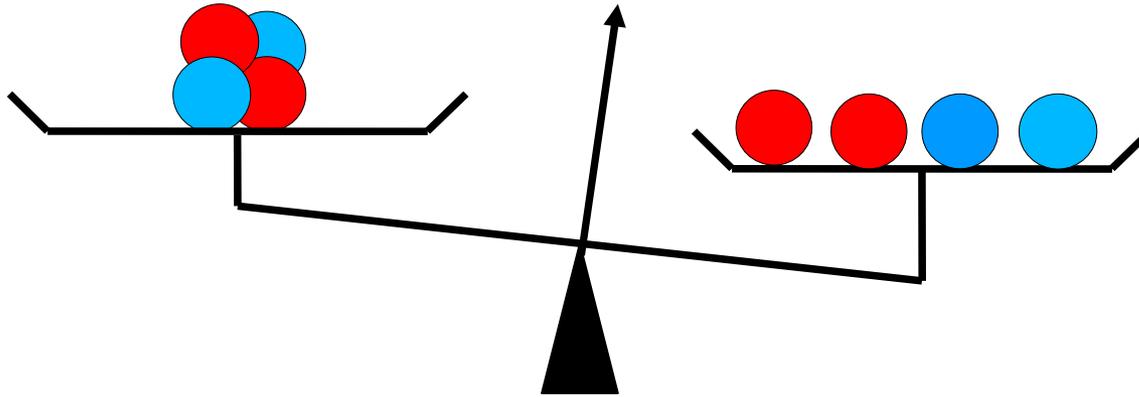
(13 atomes)



la matière, solide, liquide ou gaz : assemblage de molécules

défaut de masse

exemple: particule α (alpha)
noyau d'hélium : $Z=2$ $A=4$



masse du noyau $<$ masse des nucléons

$$\Delta m/m = 0,0075 \%$$

$$\Delta m/A = 7 \text{ MeV/nucléon}$$

masse/énergie

$$E=mc^2$$

Einstein (1879-1955)

équivalence entre la masse **m** et l'énergie **E** ($c=2,99792458 \cdot 10^8$ m/s)

réaction nucléaire : masse \rightarrow énergie.

inverse possible : rayon γ \rightarrow paire particule-antiparticule

Lavoisier (1743-1794)

« rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »

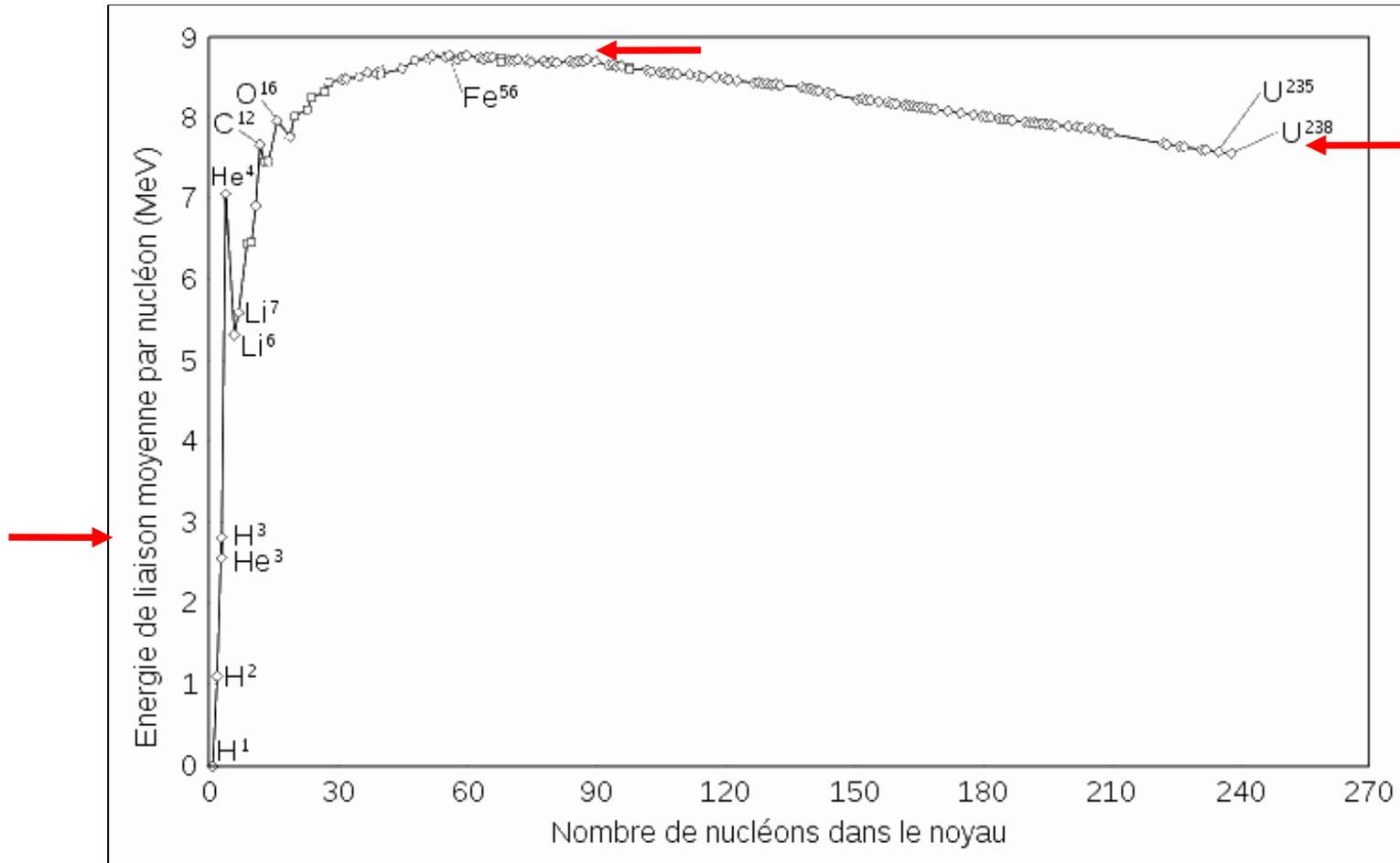
la masse se conserve lors d'une réaction chimique ? non!

mais les variations de masse sont très faibles (c^2 très grand)

à masse égale $E_{\text{nucléaire}}/E_{\text{chimique}} \sim 1\,000\,000 \sim \text{MeV/eV}$

Courbe d'Aston

selon les isotopes, l'énergie qui lie chaque nucléon est différente

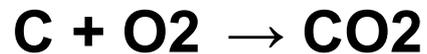


Energie des réactions : chimique / nucléaire

combustion

un kg de charbon

10 kWh

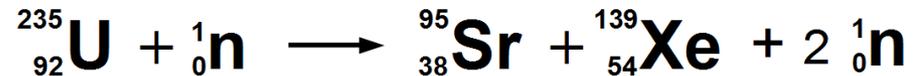


énergie atomique !

fission

un kg de combustible nucléaire
contenant 30g d'uranium fissile ^{235}U

600 000 kWh



En conditionnant le combustible sous forme de pastille il est moins risqué d'atteindre la masse critique accidentellement lors des manutentions



Dans le réacteur, la masse critique nécessaire est bien supérieure à la masse critique théorique du combustible sous forme de sphère, mais cela permet en même temps de contrôler la criticité en enlevant ou en ajoutant des barres de combustible



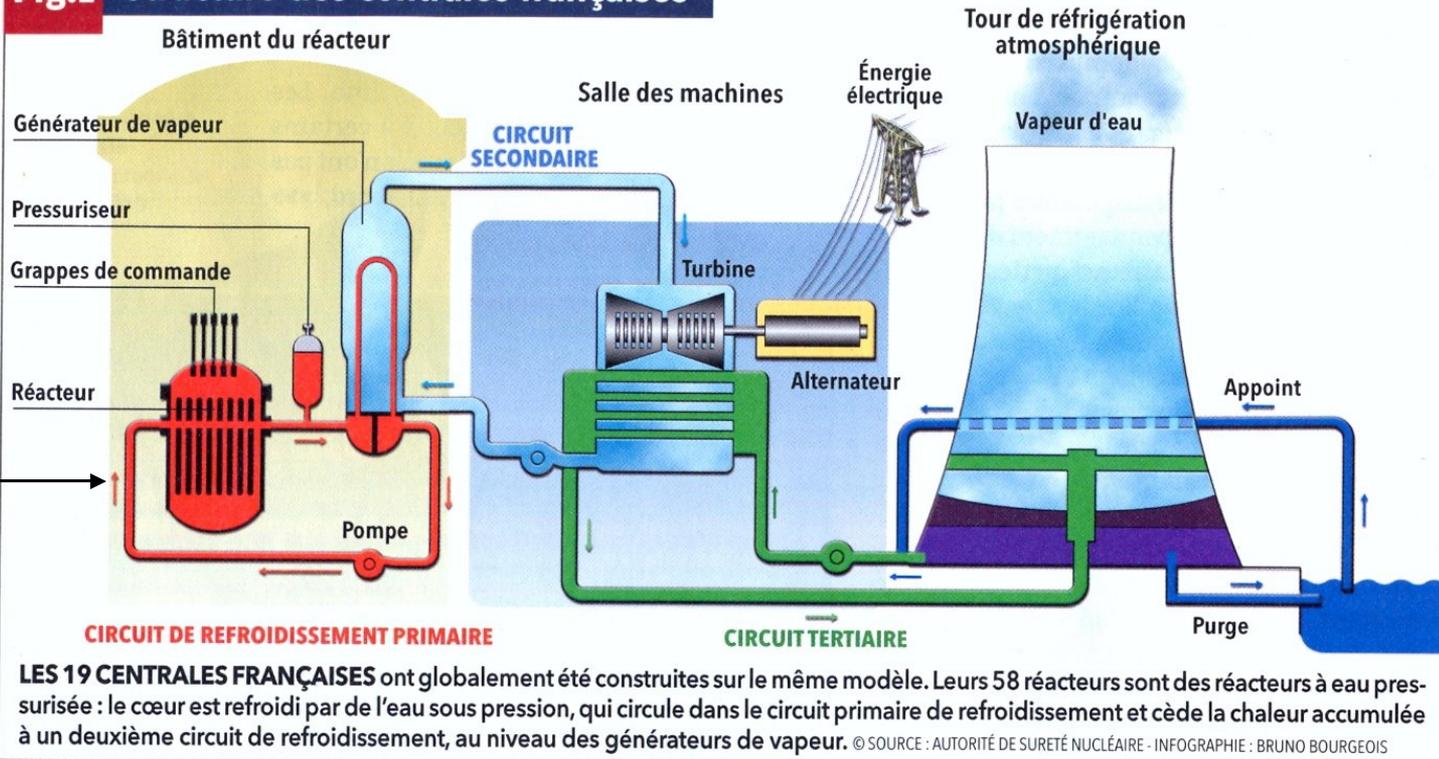
Le stockage de masses importantes de combustible se fait sous des formes favorisant une grande surface externe et de nombreuses fuites de neutrons

© Je comprends... Enfin ! 2011

énergie nucléaire

Exploitation de l'énergie nucléaire

Fig.1 Structure des centrales françaises



la fission nucléaire au cœur du réacteur

Fission et réaction en chaîne

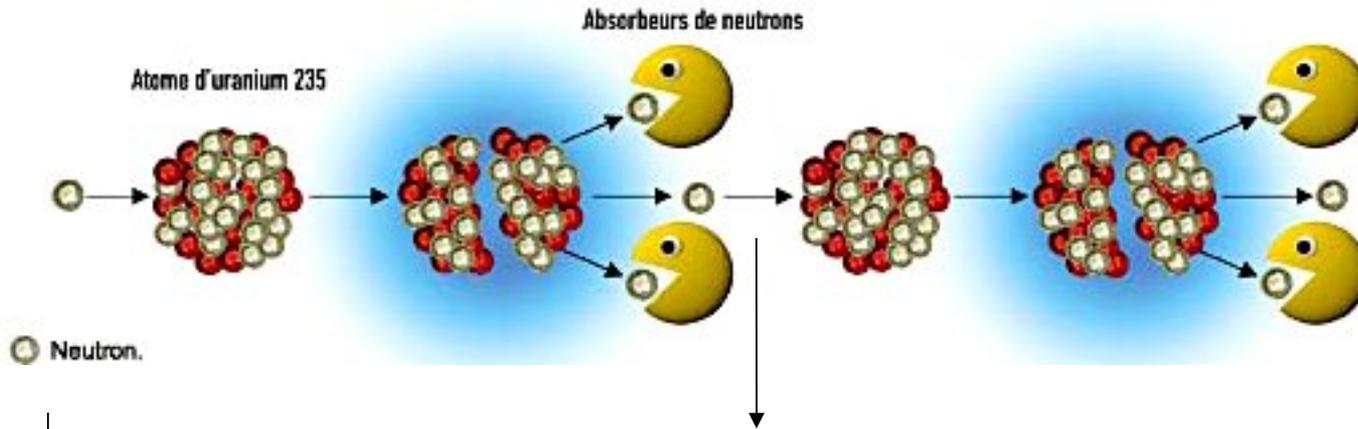
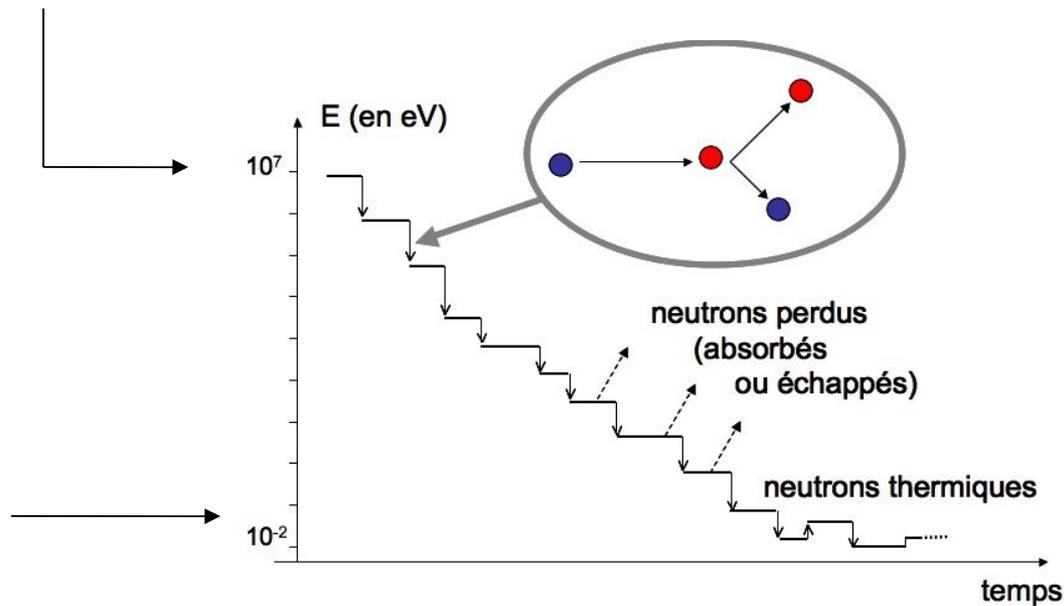


schéma du site CEA

le neutron éjecté est trop rapide $E \sim \text{MeV}$

\implies rôle du modérateur

neutron thermique
(lent, $E \sim 0,05 \text{ eV}$)



Partie 3. Historique des découvertes sur l'atome

XIXe siècle

l'hypothèse atomique

Gay-Lussac 1805

John Dalton 1808

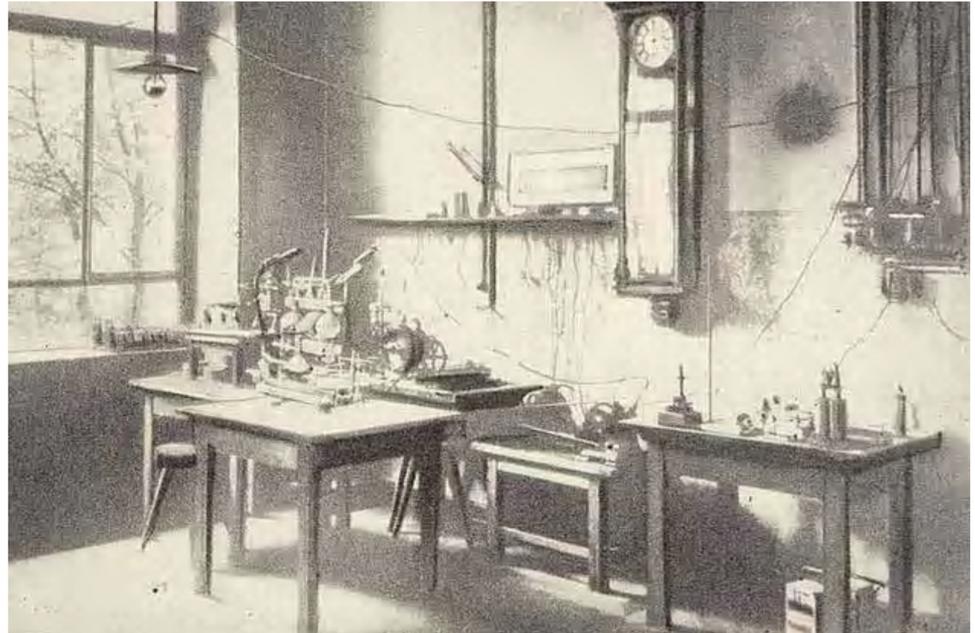
Avogadro 1811

Mendeleïev 1869

débat entre les chimistes :
la matière a-t-elle une **structure continue**
ou est-elle faite d'un **assemblage d'atomes** ?

En **1895**, le physicien Röntgen
découvre **les rayons X**

→ première radiographie
et premier pas vers la preuve
de l'existence des atomes



photographie du laboratoire de Wilhelm Röntgen

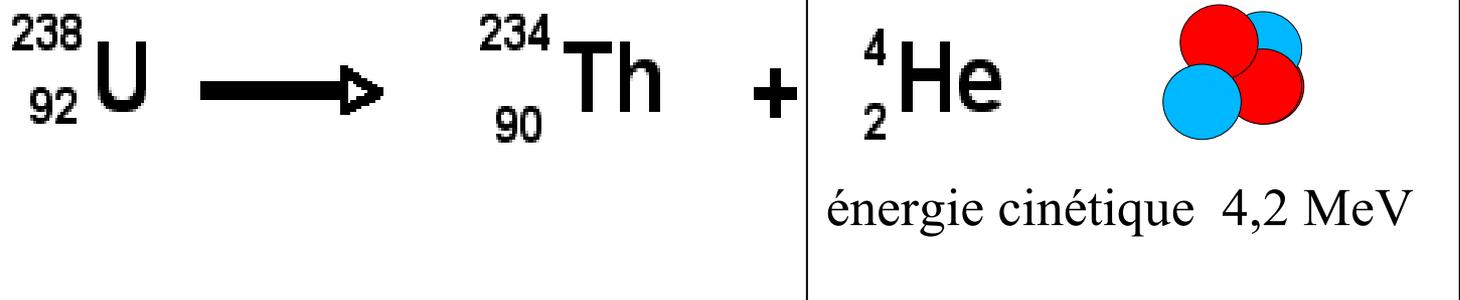
Découverte de la radioactivité naturelle

1896

Le physicien **Henri Becquerel** étudie les rayons X , par hasard il détecte des rayons d'origine inconnue, émis par des sels d'**uranium**

radioactivité α :

le gros noyau d'uranium éjecte un noyau d'hélium



probabilité 1/2 en 4,5 milliards d'année

Découverte du radium

1898 Marie Sklodowska-Curie, chimiste,
et Pierre Curie, physicien

ils observent une très grande « *radio-activité* »
dans la pechblende (minerais d'uranium)
et isolent un nouvel élément chimique,
c'est le le **radium**



isotope 226 radioactivité α : durée de vie 1602 ans

cascade de désintégrations α : $\text{U} \Rightarrow \text{Th} \Rightarrow \text{Ra} \Rightarrow \text{Rn} \Rightarrow \text{Po} \Rightarrow \text{Pb}$



Succès médiatique du radium



Début de la physique « moderne »

1896-1939

Activité intense et fructueuse des physiciens et chimistes : ils identifient les **rayonnements** α , β , γ de la radioactivité et caractérisent les **particules élémentaires** :

électron	J.J. Thomson 1897
particule α	Geiger et Rutherford 1908
noyau	Rutherford 1911 (modèle d'atome: noyau et électrons)
atome	Bohr 1913 (interprétation des spectres)
positon	Dirac 1931 (prédiction théorique)
neutron	Chadwick 1932
deuterium	Urey 1932
émission β^+	F. et J. Joliot-Curie 1934 (radioactivité artificielle)
neutrino ν	Pauli 1936 (prédiction théorique)

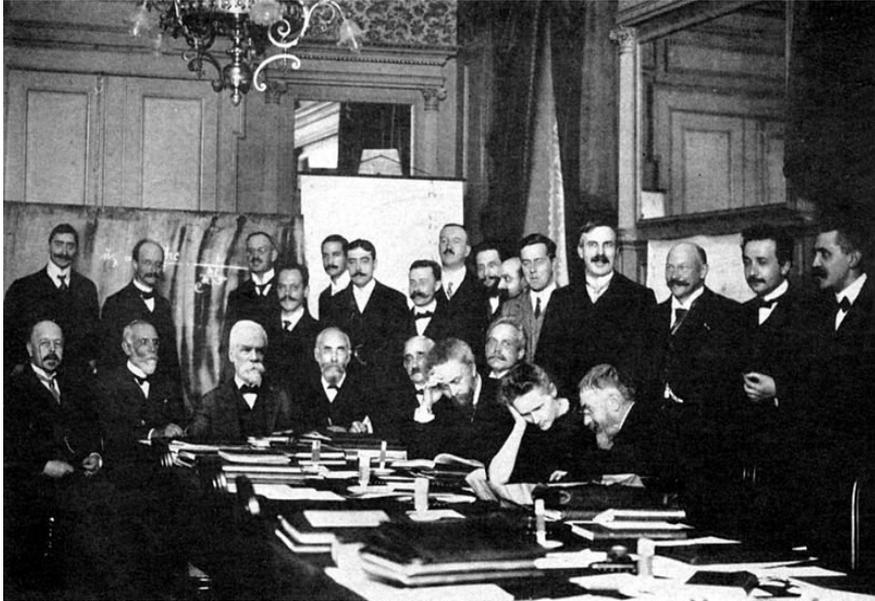
Entre **1924-1928** la théorie **quantique** s'impose pour expliquer les phénomènes observés :

de Broglie, Schrödinger, Heisenberg

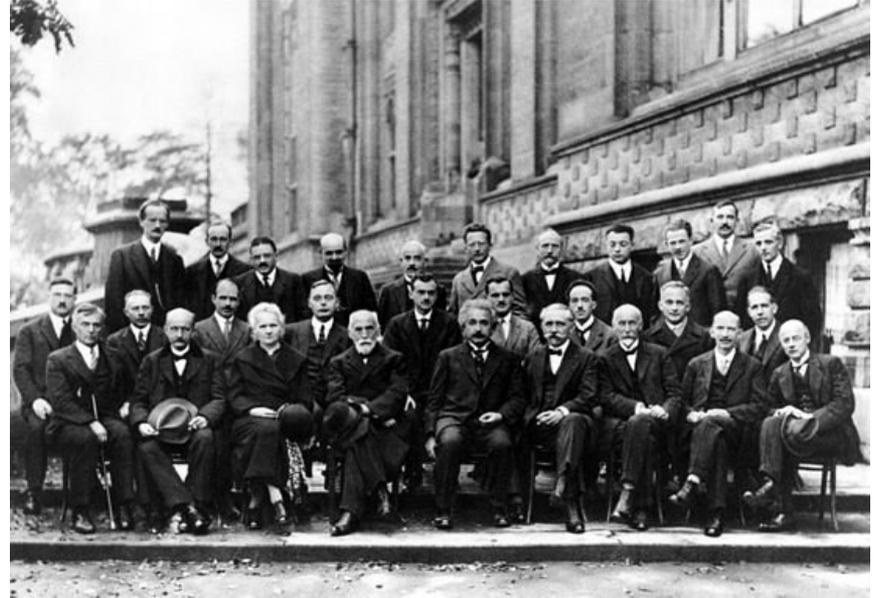
En **1938** découverte de la **fission** par Hahn et Strassman

Conférences Solvay à Bruxelles

1911



1927



1911, assis, g à d : Nernst, Brillouin, Solvay, Lorentz, Warburg, Perrin, Wien, Marie Curie, Poincaré
debout, g à d : Goldschmidt, Planck, Rubens, Sommerfeld, Lindemann, de Broglie, Knudsen,
Hasenohrl, Hostelet, Herzen, Jeans, Rutherford, Kamerling Onnes, Einstein, Langevin

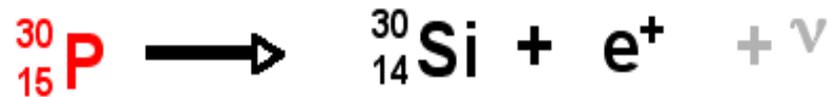
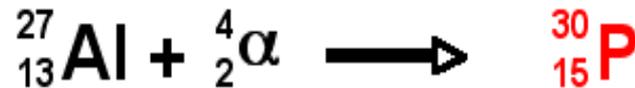
1927, 1er rang : Langmuir, Planck, Marie Curie, Lorentz, Einstein, Langevin, Guye, Wilson, Richardson,
2e rang : Debye, Knudsen, Bragg, Kramers, Dirac, Compton, de Broglie, Born, Bohr
3e rang : Picard, Henriot, Ehrenfest, Herten, de Donder, Schrödinger, Verschaffelt, Pauli, Heisenberg, Fowler, Brillouin

Découverte de la radioactivité artificielle



1934

Frédéric et Irène Joliot-Curie observent que l'aluminium **Al** irradié par des particules α devient un élément radioactif, un isotope du phosphore ^{30}P (période 3min.)



radioactivité de type β^+ , le neutrino ν est prédit par Pauli

L'arme nucléaire

1939-45 course à l'arme nucléaire :

Aux USA en 1941, Roosevelt lance le projet Manhattan ,
Truman lui succède en avril 1945

août 1945 deux bombes sont lancées sur le Japon :

à Hiroshima : bombe à uranium (20 kg ^{235}U)

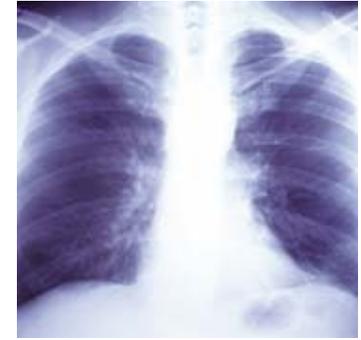
à Nagasaki : bombe au plutonium (10 kg ^{239}Pu)

équivalence ~ 20 000 tonnes d'explosif chimique

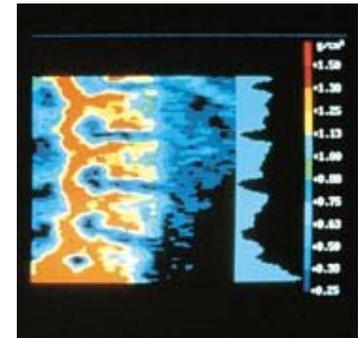
1945-1989 guerre froide et construction d'armes de dissuasion

Applications médicales

Radiothérapie : sources de rayons X au cobalt
 ^{60}Co émetteur 1,17 MeV (longueur d'onde $\sim 10^{-6} \mu\text{m}$)



Scintigraphie : traceurs radioactifs
traceur ^{123}I à courte période ($t_{1/2}=13$ heures)
examens de la thyroïde, scintigraphies osseuses



TEP : tomographie par émission de positons e^+
le marqueur du glucose ^{15}O ($t_{1/2}=2$ minutes)
images du cerveau



photos CEA

Le CEA et la production d'énergie nucléaire en France

- 1945** création du CEA : ordonnance du Général de Gaulle
premier haut-commissaire : Frédéric Joliot-Curie
recherches actuelles (hors applications militaires) :
5 centres : Saclay, Fontenay, Grenoble, Marcoule, Cadarache
3 directions : Sciences du vivant, Sciences de la matière et Recherche technologique
- 1948** première pile atomique Zoé à Fontenay-aux-Roses
- 1953** appel d'Eisenhower à l'ONU : "Atoms for Peace"
- 1955 et 1958** Conférences internationales sur les applications pacifiques de l'énergie atomique
- 1963-1972** construction de six réacteurs UNGG (uranium-naturel-graphite-gaz)
aujourd'hui arrêtés : Chinon, St-Laurent, Bugey
- 1969** réorientation vers les réacteurs à eau
- 1975-1990** mise en service des REP (réacteurs à eau pressurisée)
- 1973-2009** réacteurs à neutrons rapides : Phénix
1986-1997 : Super-Phénix
- actuellement** : 58 réacteurs en France, sur 440 dans le monde

Organismes, associations

CEA

recherche fondamentale et appliquée

AREVA

fabrication et traitement du combustible

EDF

production d'électricité nucléaire

ANDRA

Agence Nationale pour la gestion des Déchets RadioActifs

IRSN

Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ASN

Autorité de Sûreté Nucléaire (2006)

AIEA

Agence Internationale de l'énergie atomique

SFEN

Société française d'énergie nucléaire

CRIRAD

Commission de Recherche et d'Information
Indépendante sur la RADioactivité (1986)

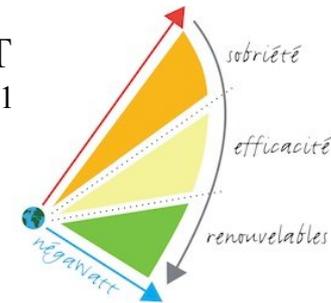
WIN

Women in nuclear et WIN-France

réseau **SORTIR DU NUCLEAIRE**

NEGAWAT

scénario 2011



etc...

et presse

