

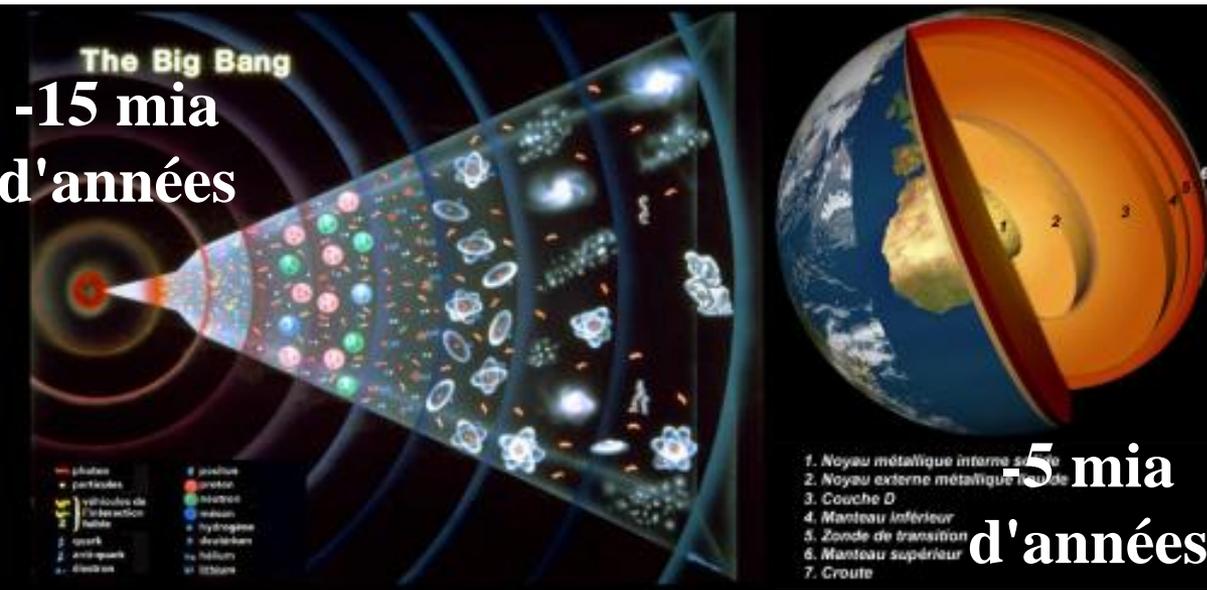
Bases de physique

Jérôme DAMET
Institut de radiophysique
CHUV
Lausanne

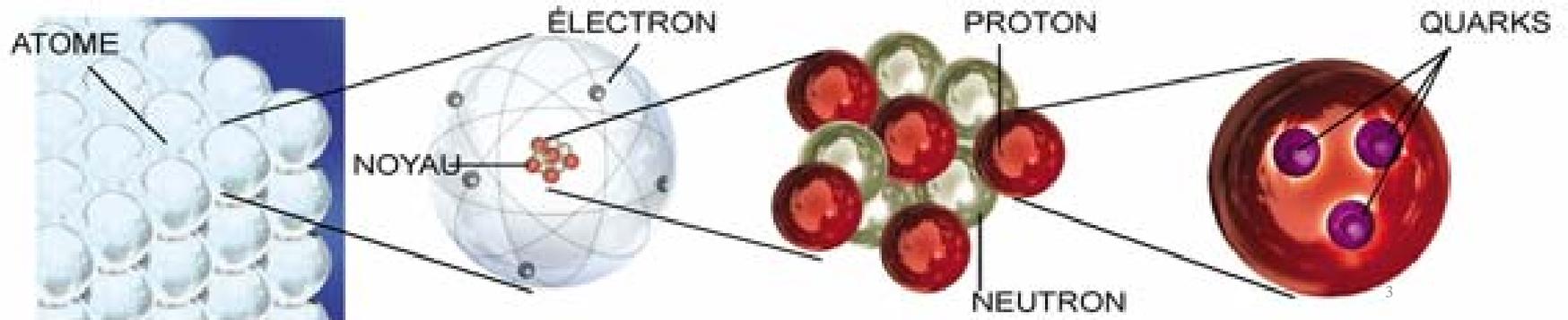
Cours de radioprotection
Janvier 2018



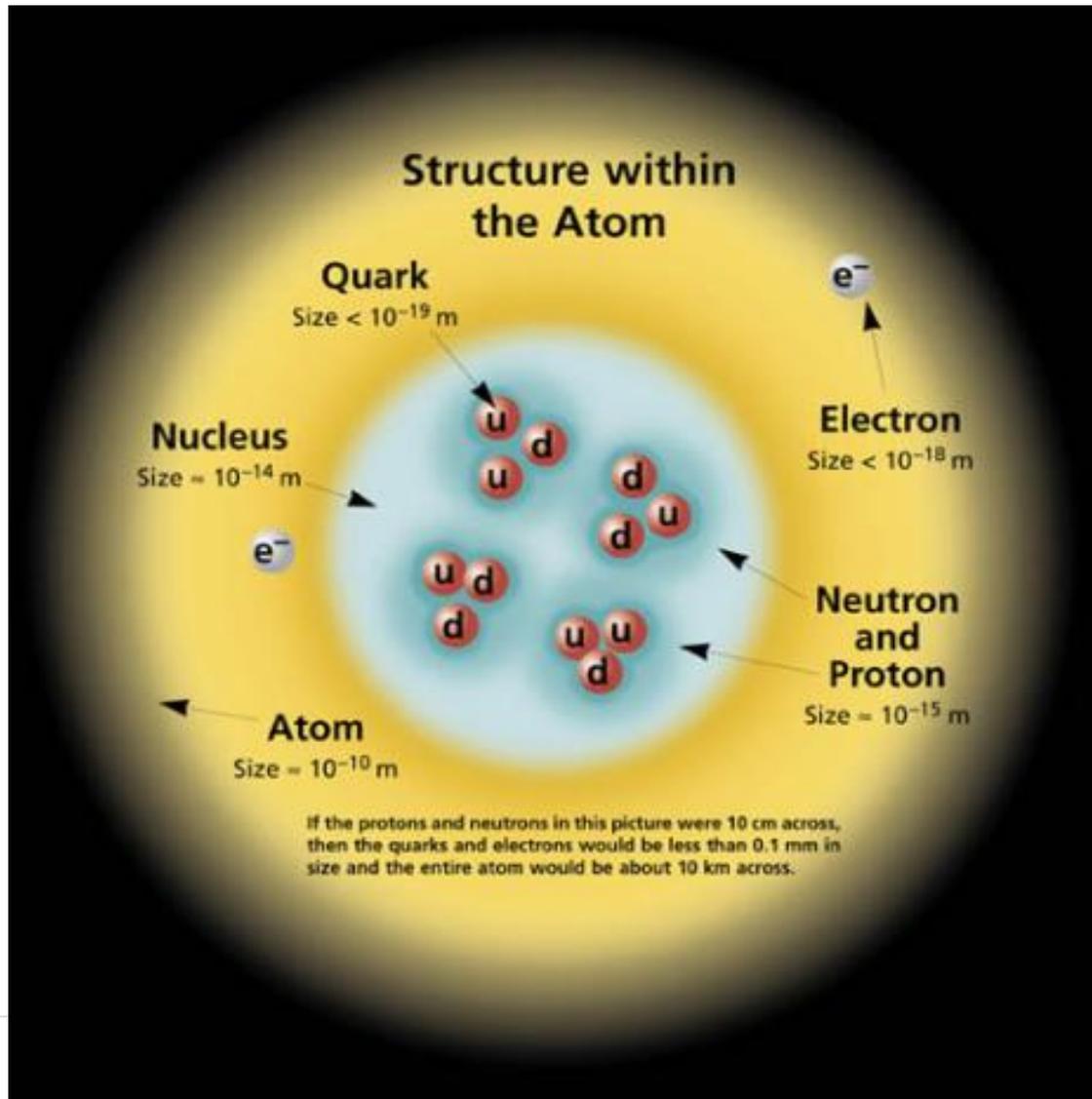
Constituants de la matière



Caractéristiques des particules élémentaires



Structure de l'atome



Nomenclature

Nombre de masse

caractérise la masse
du noyau : $N + Z$

Élément

caractérisé par le nombre de
protons

C = carbone

i.e. $Z = 6$ protons

A

E

Z

N

Nombre de protons

caractéristiques chimiques
de l'élément

Nombre de neutrons

différents N pour un Z donné
= isotopes

Nomenclature



- Pourquoi peut-on remplacer ${}^{14}_6\text{C}_8$ par ${}^{14}\text{C}$?
- Si l'on indique élément = C
 $\Rightarrow Z=6$
- Sachant que A vaut 14 et Z vaut 6
 \Rightarrow on sait que $N=8$

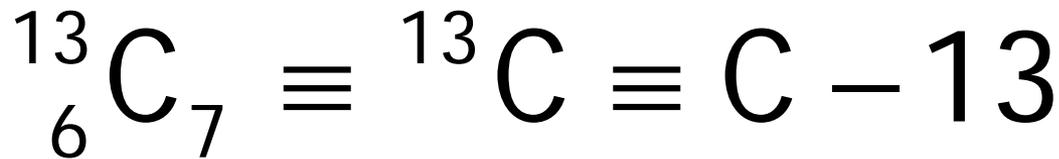
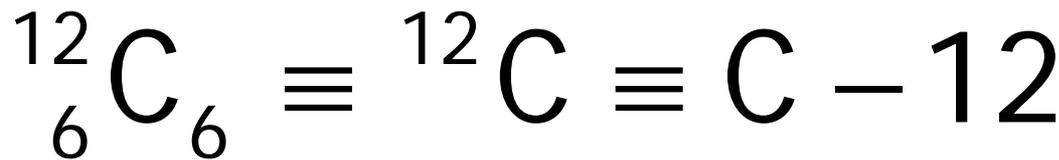
*notations
équivalentes*



Nomenclature

A
E
Z N

- Exemples



isotopes
du
carbone



Structure de la matière

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

http://www.ck12.org/periodic/

MÉTALLOÏDES RELATIFS (1)

GROUPES IUPAC

SYMBÔLE

NOM DE L'ÉLÉMENT

Métaux Métalloïdes Non-métaux

Métaux alcalins Halogènes

Métaux alcalino-terreux Gaz nobles

Lanthanides Actinides

ÉTAT PHYSIQUE (100 °C; 101 kPa)

Ne - gaz Fe - solide

Ga - liquide Te - synthétique

GROUPE		TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS																18 - VIIIA						
1 - IA		2 - IIA		3 - IIIA 4 - IVB 5 - VB 6 - VIB 7 - VIIB 8 - VIIIB 9 - VIIIB 10 - VIIIB 11 - IB 12 - IIB										13 - IIIA 14 - IVA 15 - VA 16 - VIA 17 - VIIA		18 - VIIIA								
PERIODE		NOMBRE ATOMIQUE																						
1	1.0079																	2	4.0026					
1	H																	2	He					
2	3 6.941	4 9.0122																	5 10.811	6 12.011	7 14.007	8 15.999	9 16.998	10 20.180
2	Li	Be																	B	C	N	O	F	Ne
3	11 22.990	12 24.305																	13 26.982	14 28.086	15 30.974	16 32.005	17 35.453	18 39.948
3	Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19 39.098	20 40.078	21 44.956	22 47.867	23 50.942	24 51.996	25 54.938	26 55.845	27 58.933	28 58.693	29 63.546	30 65.39	31 69.723	32 72.64	33 74.922	34 78.96	35 79.904	36 83.80						
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
5	37 85.468	38 87.62	39 88.906	40 91.224	41 92.906	42 95.94	43 (98)	44 101.07	45 102.91	46 106.42	47 107.87	48 112.41	49 114.82	50 118.71	51 121.76	52 127.60	53 126.90	54 131.29						
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
6	55 132.91	56 137.33	57-71	72 178.49	73 180.96	74 183.84	75 186.21	76 190.23	77 192.22	78 195.08	79 196.97	80 200.59	81 204.38	82 207.2	83 208.98	84 (209)	85 (210)	86 (222)						
6	Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
7	87 (223)	88 (226)	89-103	104 (261)	105 (262)	106 (266)	107 (264)	108 (267)	109 (268)	110 (269)	111 (272)	112 (285)	113 (289)	114 (289)	115 (289)	116 (289)	117 (289)	118 (289)						
7	Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uuq	Uuq	Uuq	Uuq	Uuq	Uuq						

LANTHANIDES

57 138.91	58 140.12	59 140.91	60 144.24	61 (145)	62 150.36	63 151.96	64 157.25	65 158.93	66 162.50	67 164.93	68 167.26	69 168.93	70 173.04	71 174.97
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
LANTHANUM	CERMIUM	PRASEODYMIUM	NEODYMIUM	PROMETHIUM	SAMARIUM	EUROPIUM	GADOLINIUM	TERBIUM	DYSPROSIUM	HOLEMIUM	ERBIUM	THULIUM	YTTBIUM	LUTETIUM

ACTINIDES

89 (227)	90 232.04	91 237.04	92 238.03	93 (237)	94 (244)	95 (243)	96 (247)	97 (247)	98 (251)	99 (252)	100 (257)	101 (258)	102 (259)	103 (262)
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
ACTINIUM	THORIUM	PROCTINIUM	URANIUM	NEPTUNIUM	PLUTONIUM	AMERICIUM	CURIUM	BERKELEIUM	CALIFORNIUM	FERMIUM	MENDÉLÉVIUM	NOBELIUM	LAWRENCIUM	

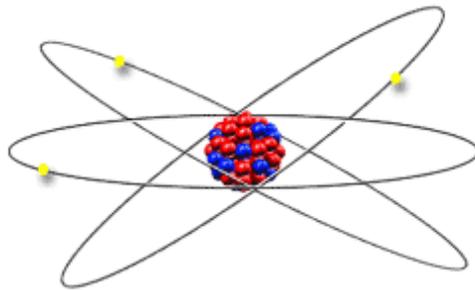
(1) Pure Appl. Chem., 73, No. 4, 607-660 (2001)

La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, le poids atomique par défaut est indiqué entre parenthèses et indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant le plus grand nombre de masse.

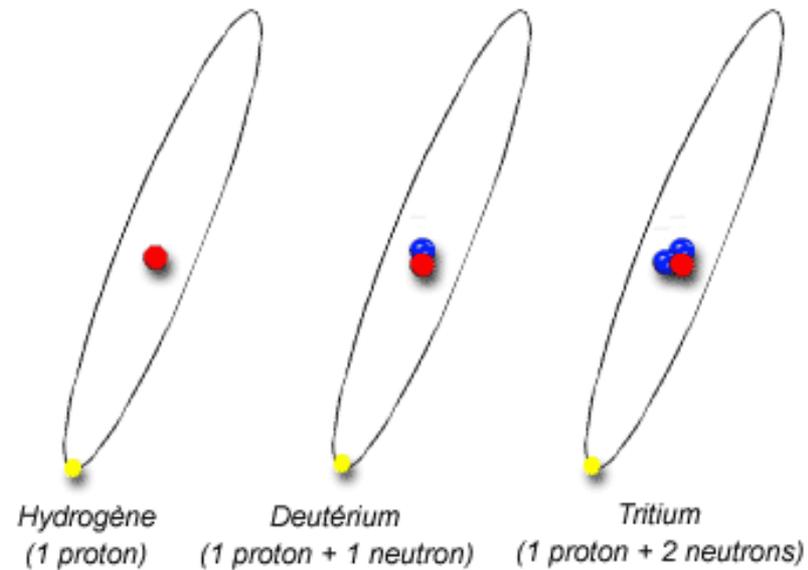
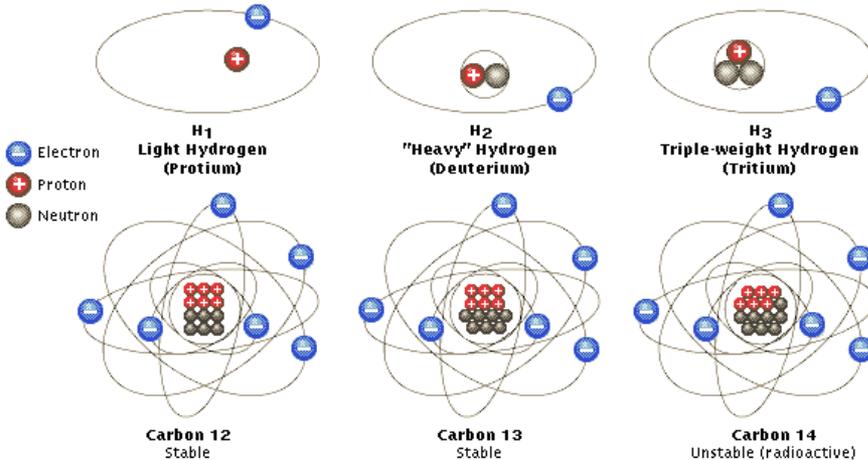
Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une configuration électronique connue, une masse atomique est indiquée.

Édité par Michel Dele

Isotopes



● Proton ● Neutron ● Electron



hydrogène qui a trois isotopes :

- **hydrogène:** 1 p, 1 e⁻
- **deutérium:** 1 p, 1 n, 1 e⁻
- **tritium:** 1 p, 2 n, 1 e⁻

Lorsqu'un isotope a **beaucoup** plus de neutrons que de protons, ou l'inverse, son noyau devient instable.

Il se transforme (ou se désintègre) en émettant un rayonnement pour libérer son énergie et retrouver son équilibre. C'est ce phénomène que l'on nomme la radioactivité.

Table des isotopes

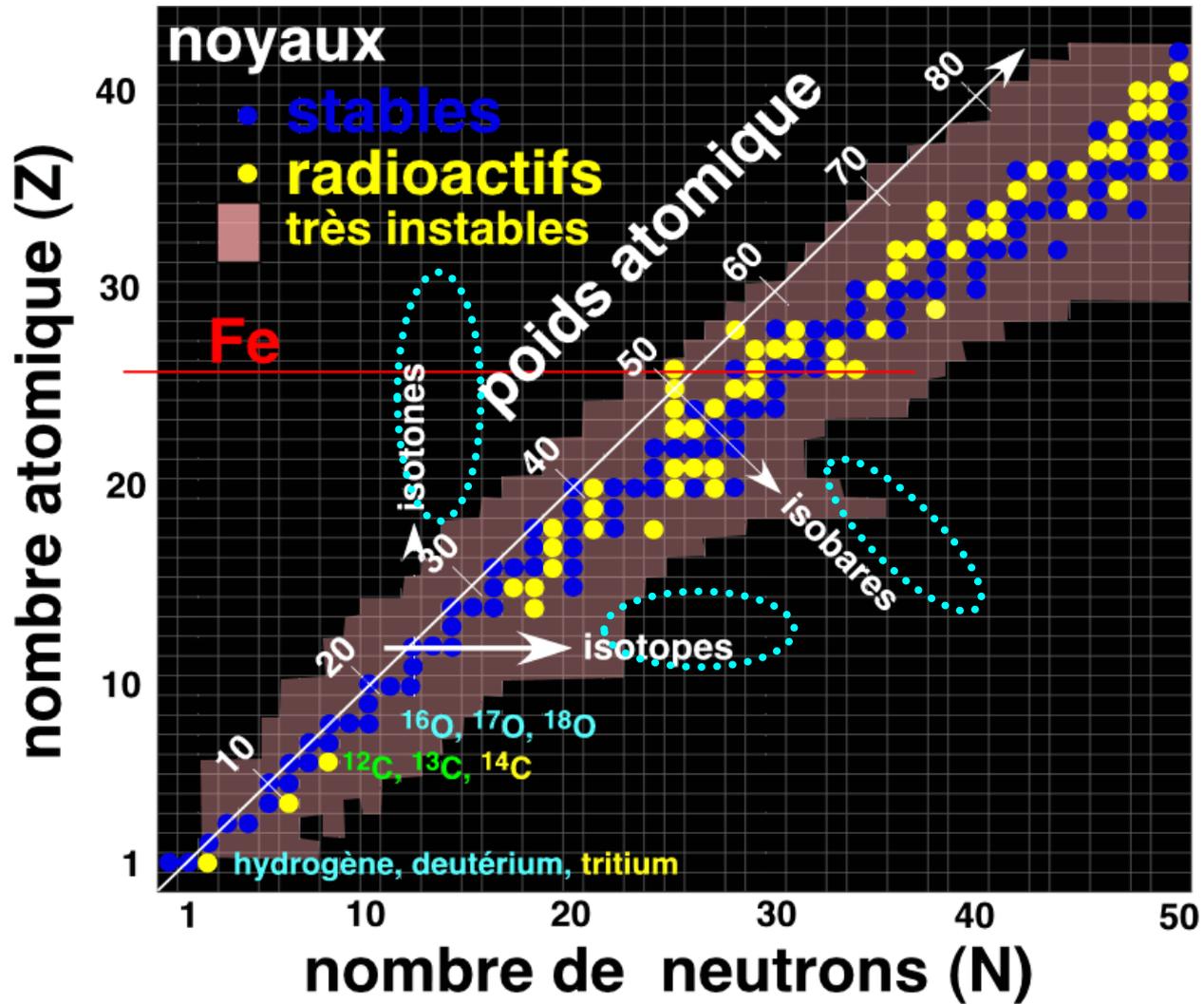
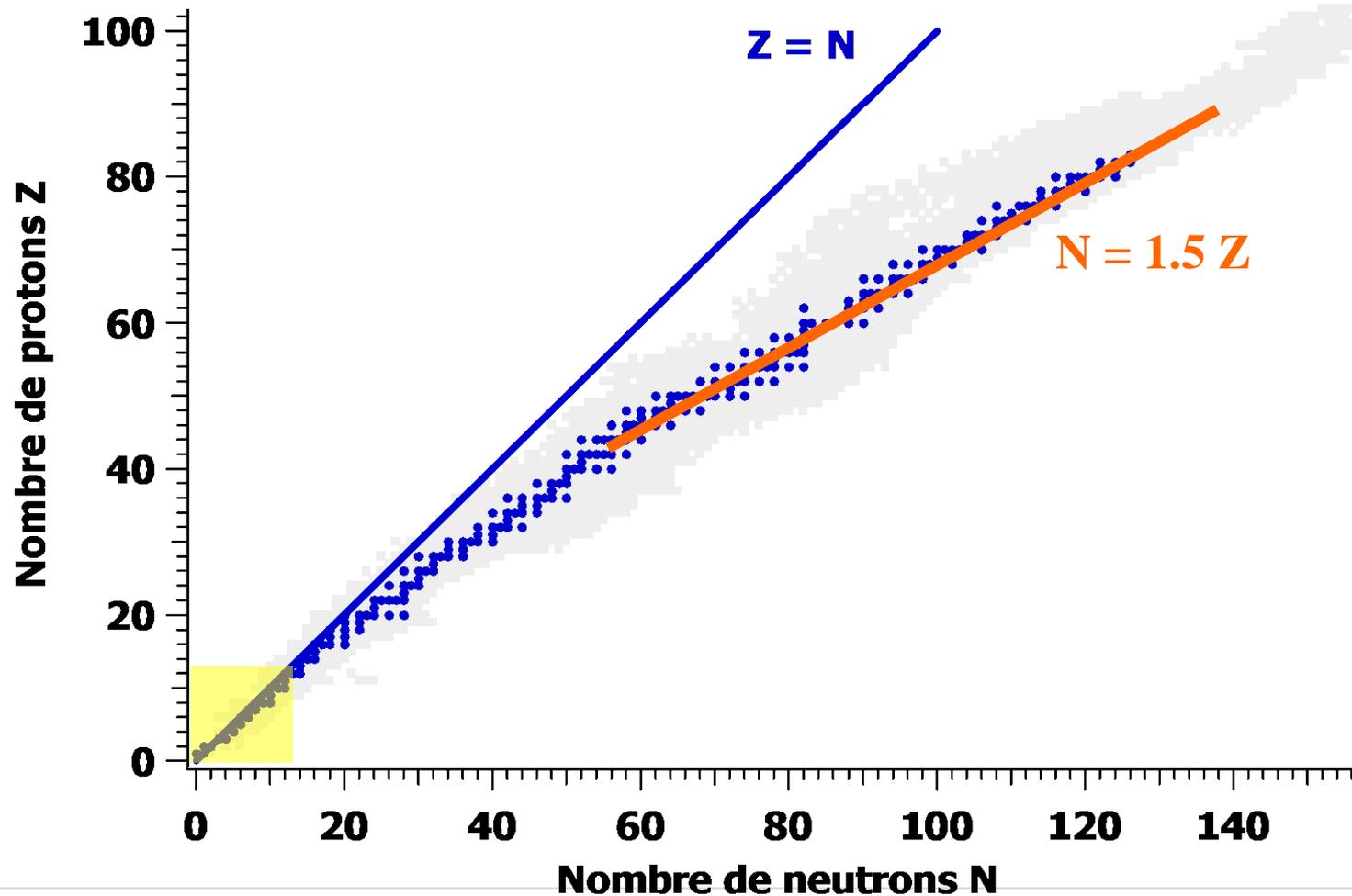
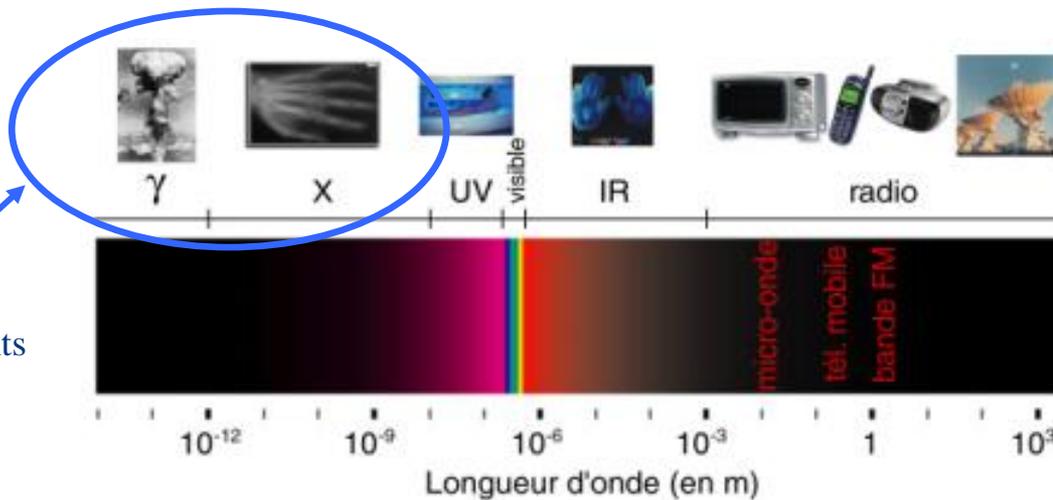
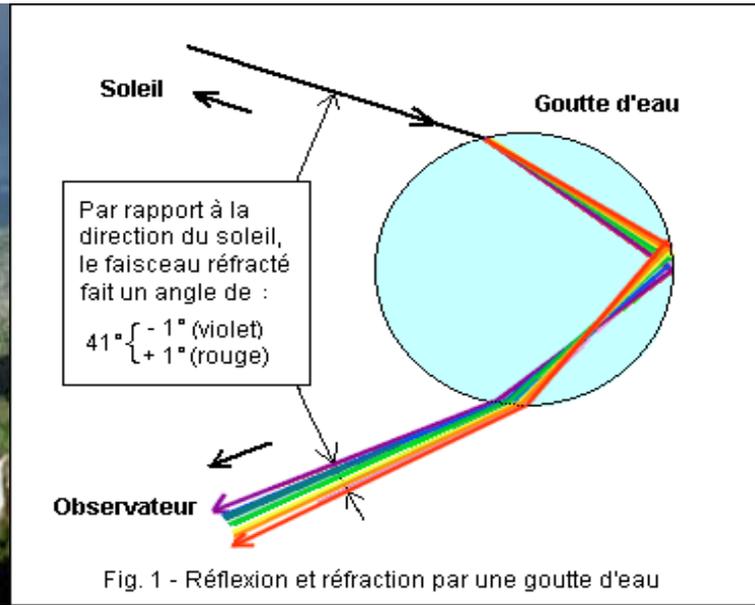


Table des isotopes



Ondes électromagnétiques



Rayonnements ionisants

Spectre Complet

Rayonnements ionisants

Ces rayonnements ont une forte énergie et sont capables **d'arracher des électrons aux atomes**; c'est pourquoi on les appelle "rayonnements ionisants". Le rayonnement électromagnétique peut provoquer une ionisation si la longueur d'ondes est inférieure à 100 nanomètres parce que, dans ces limites, le photon a suffisamment d'**énergie** pour expulser un électron.

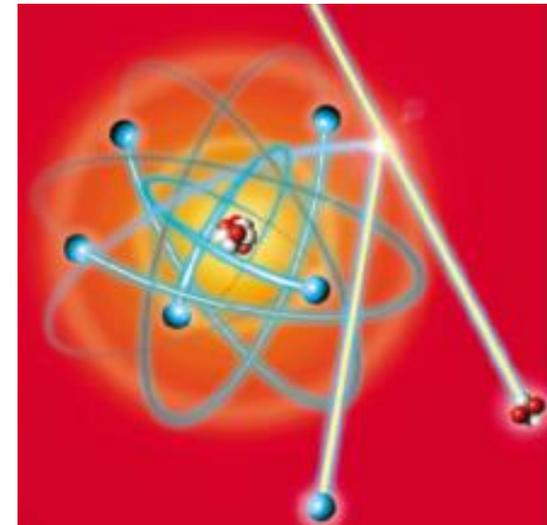
On distingue différents types de rayonnements ionisants:

1. **Particules**

(neutrons, protons, rayonnement α , rayonnement β)

2. **Ondes électromagnétiques**

(rayonnement γ , rayons X)



La radioactivité

Qu'est-ce que la radioactivité ?

La matière est faite d'atomes, la plupart du temps assemblés en molécules. Au cœur de ces atomes, se trouve un noyau, 10 000 à 100 000 fois plus petit.

La radioactivité est un phénomène qui se produit au plus profond des atomes, dans ce noyau.

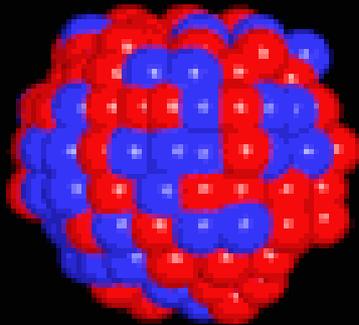
Certains noyaux atomiques instables sont la source de rayonnements α , β , γ , neutron.

- Pour quelles raisons certains noyaux sont-ils instables ? Pourquoi émettent-ils un rayonnement plutôt qu'un autre ?
- A quel rythme se désintègrent-ils et pendant combien de temps ?
- Comment mesure-t-on leur degré de radioactivité ?
- Quelle est l'origine de ces rayonnements auxquels nous sommes soumis ?
- Quels sont les principaux corps radioactifs ?

Définitions

- Désintégration radioactive
 - Mécanisme **spontané et aléatoire**
- Probabilité de désintégration par unité de temps
 λ [s⁻¹]
 - Constante de désintégration
 - **Spécifique au noyau considéré**
 - Ne varie pas avec le temps

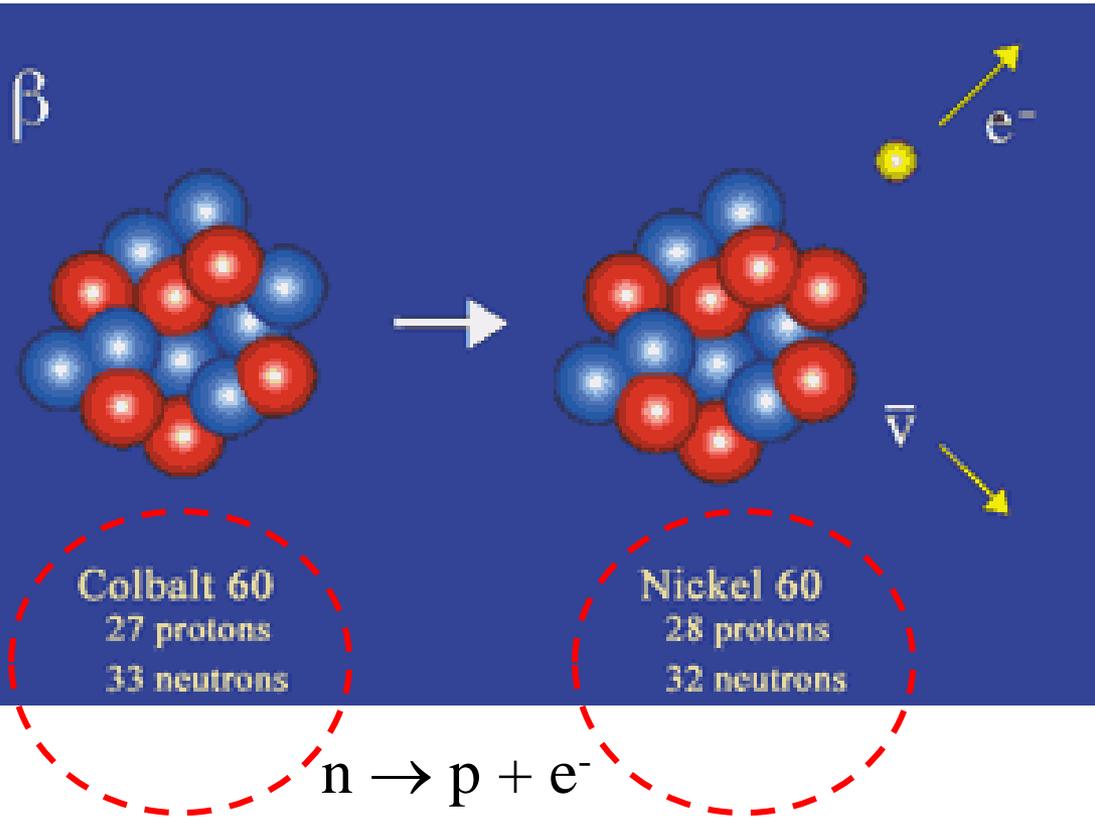
Types de radioactivité



Désintégration α :

Emission d'un noyau d'hélium : **2 protons + 2 neutrons**

Types de radioactivité

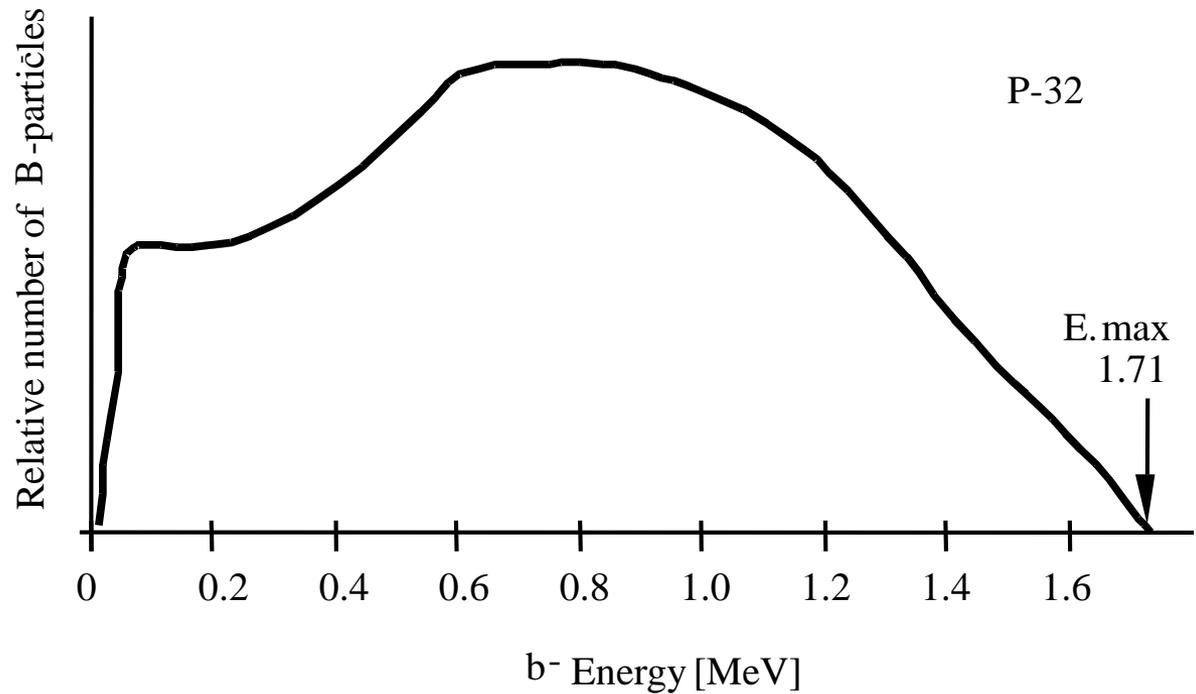
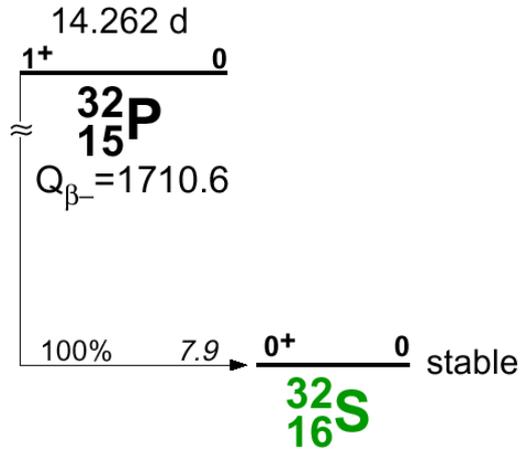


bêta

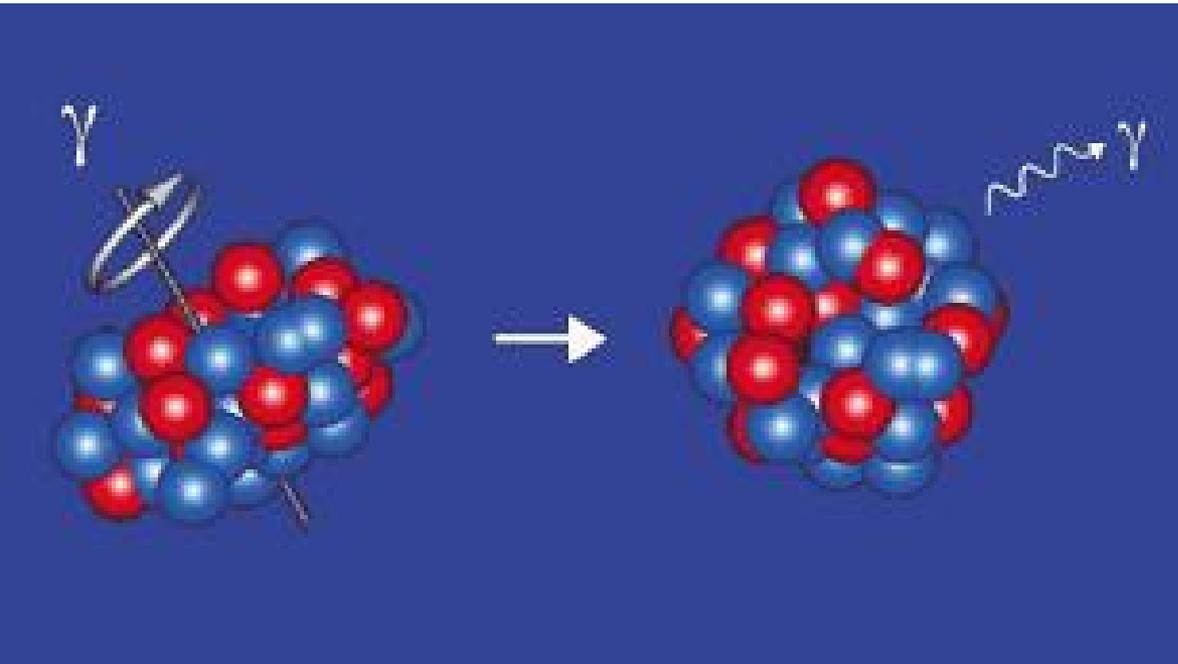
Remarque: on peut aussi observer la radioactivité β^+



Exemple de désintégration β^-



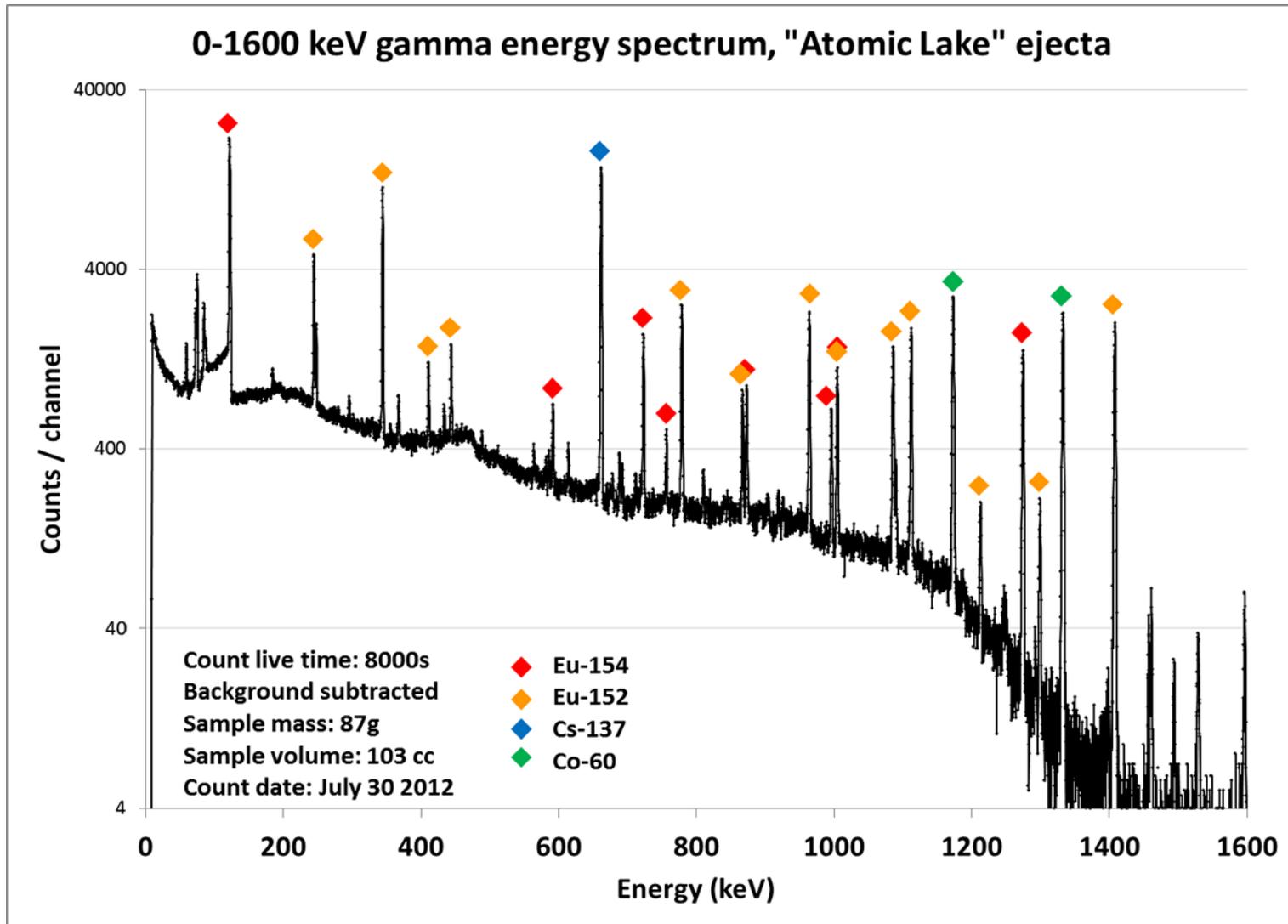
Types de radioactivité



gamma

Emission par le noyau d'un photon (rayonnement gamma)

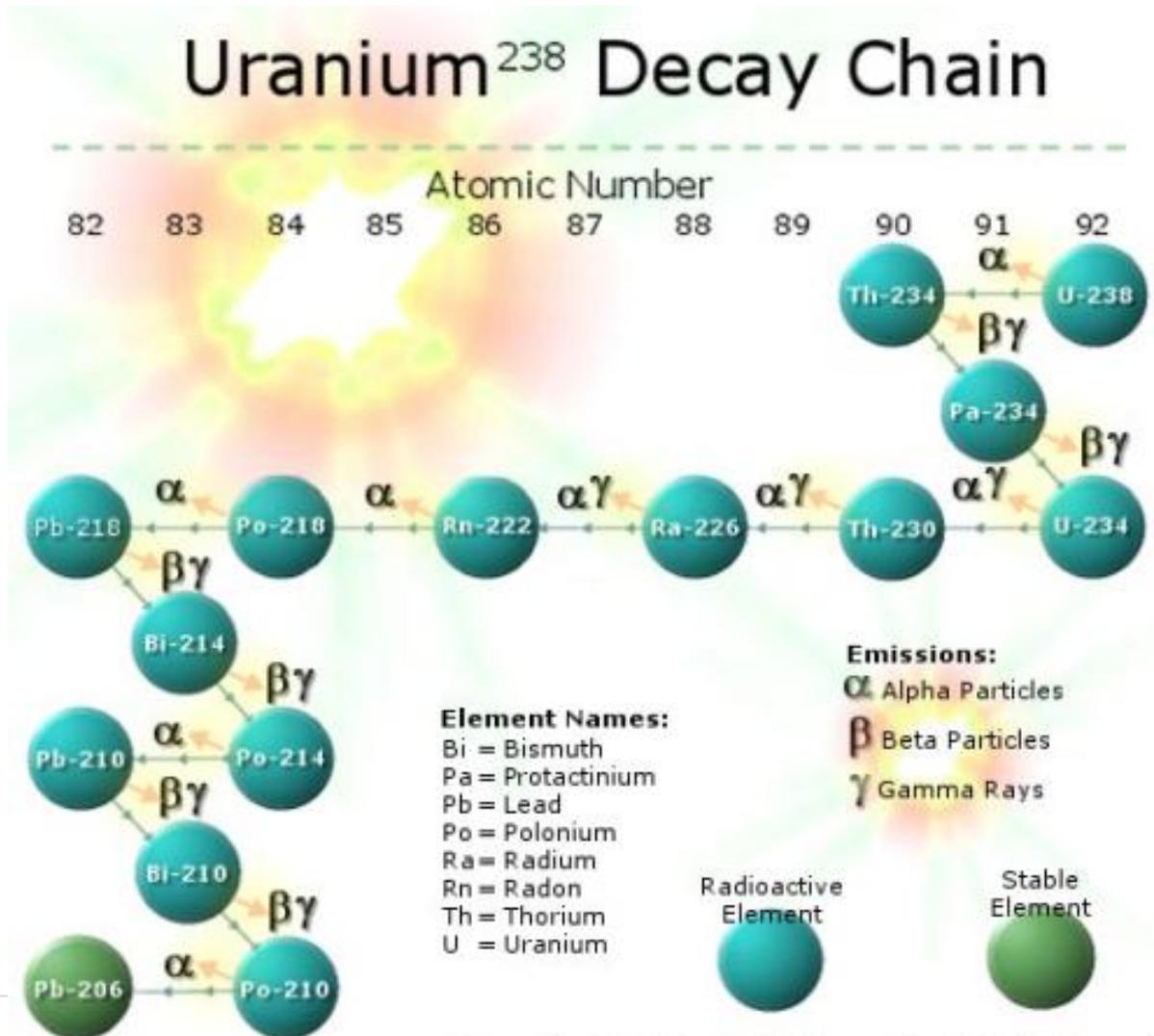
Types de radioactivité



Identification d'un élément par spectrométrie gamma

Trois types de radioactivité

α , β^\pm , γ



Types de radioactivité

Un élément peut se désintégrer de plusieurs manières

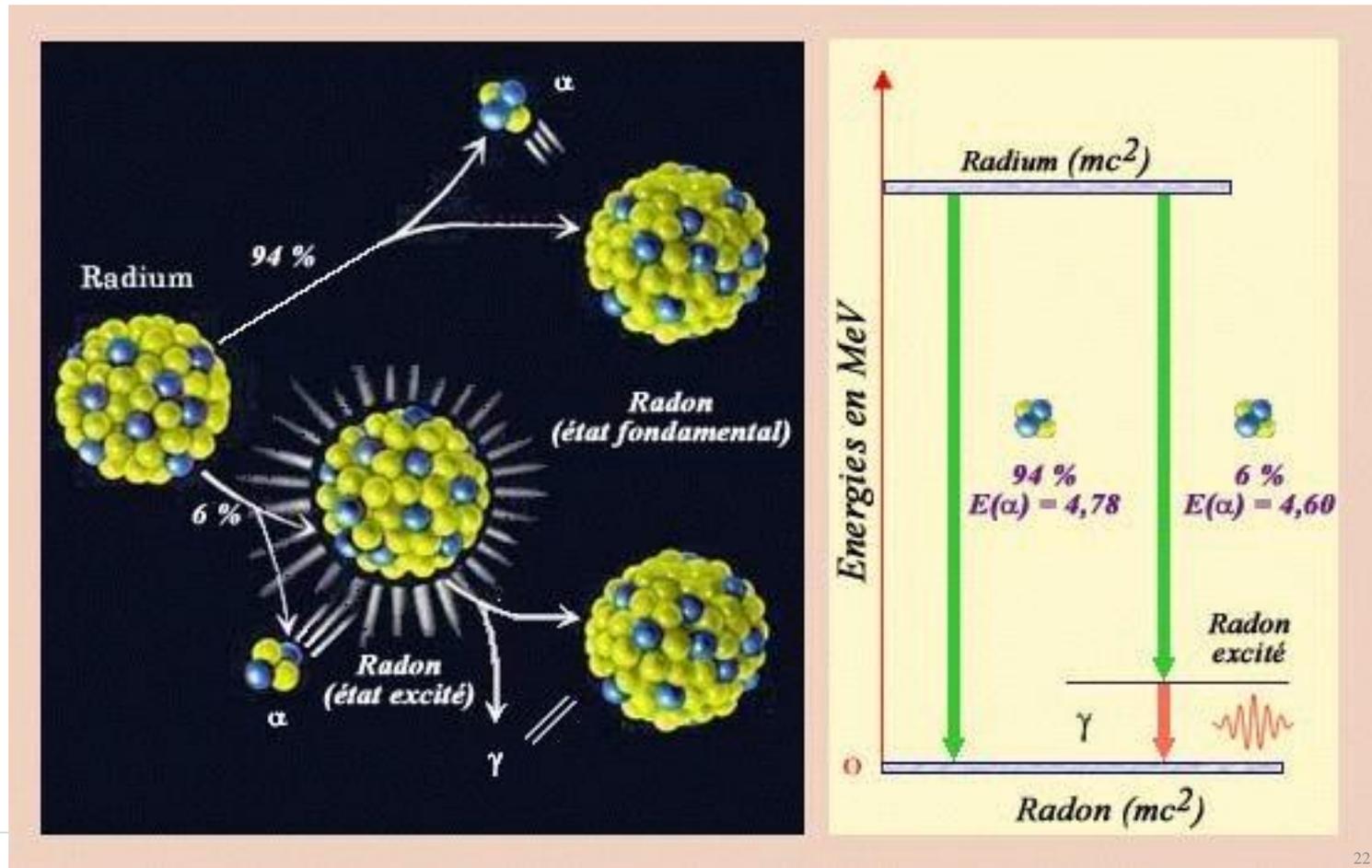


Schéma de désintégration

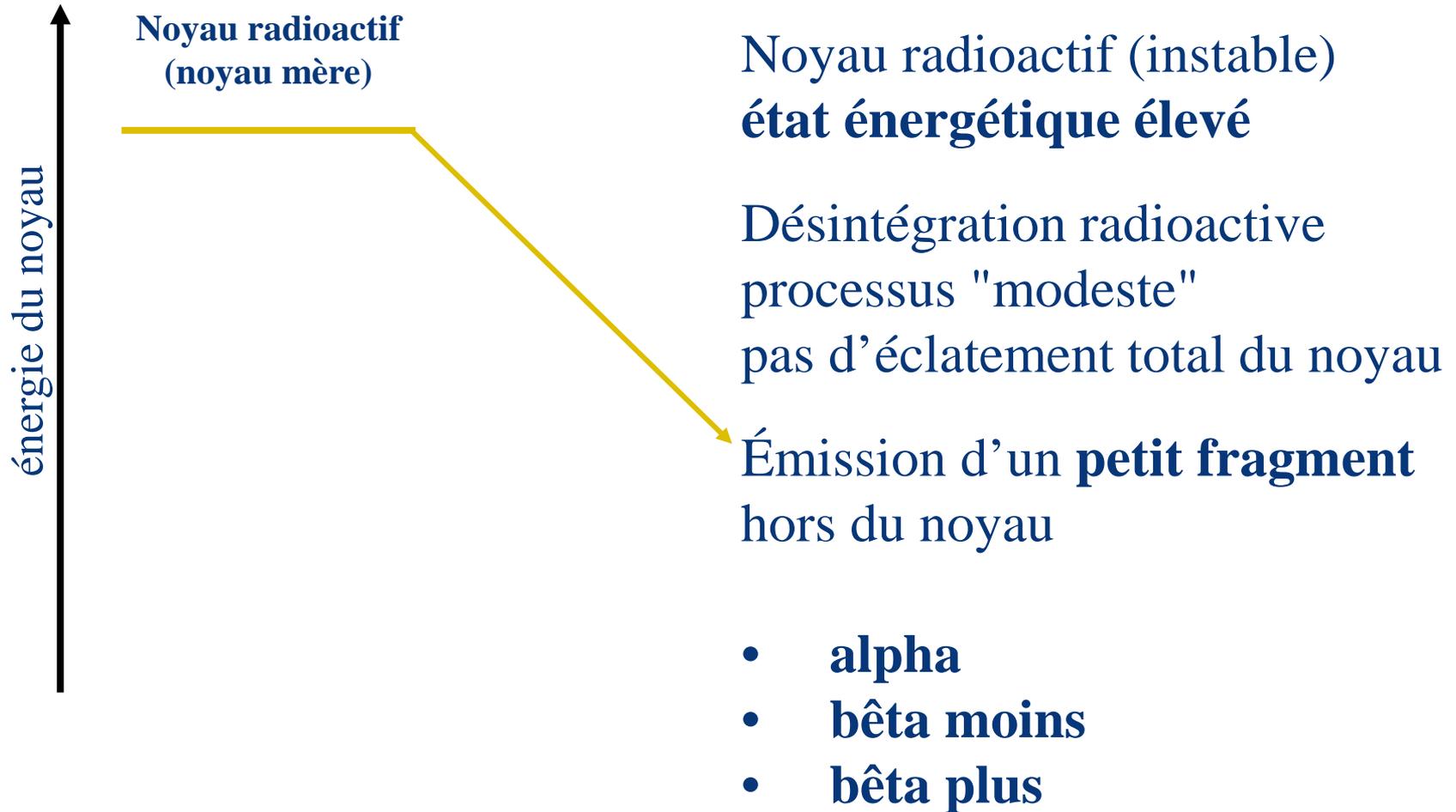
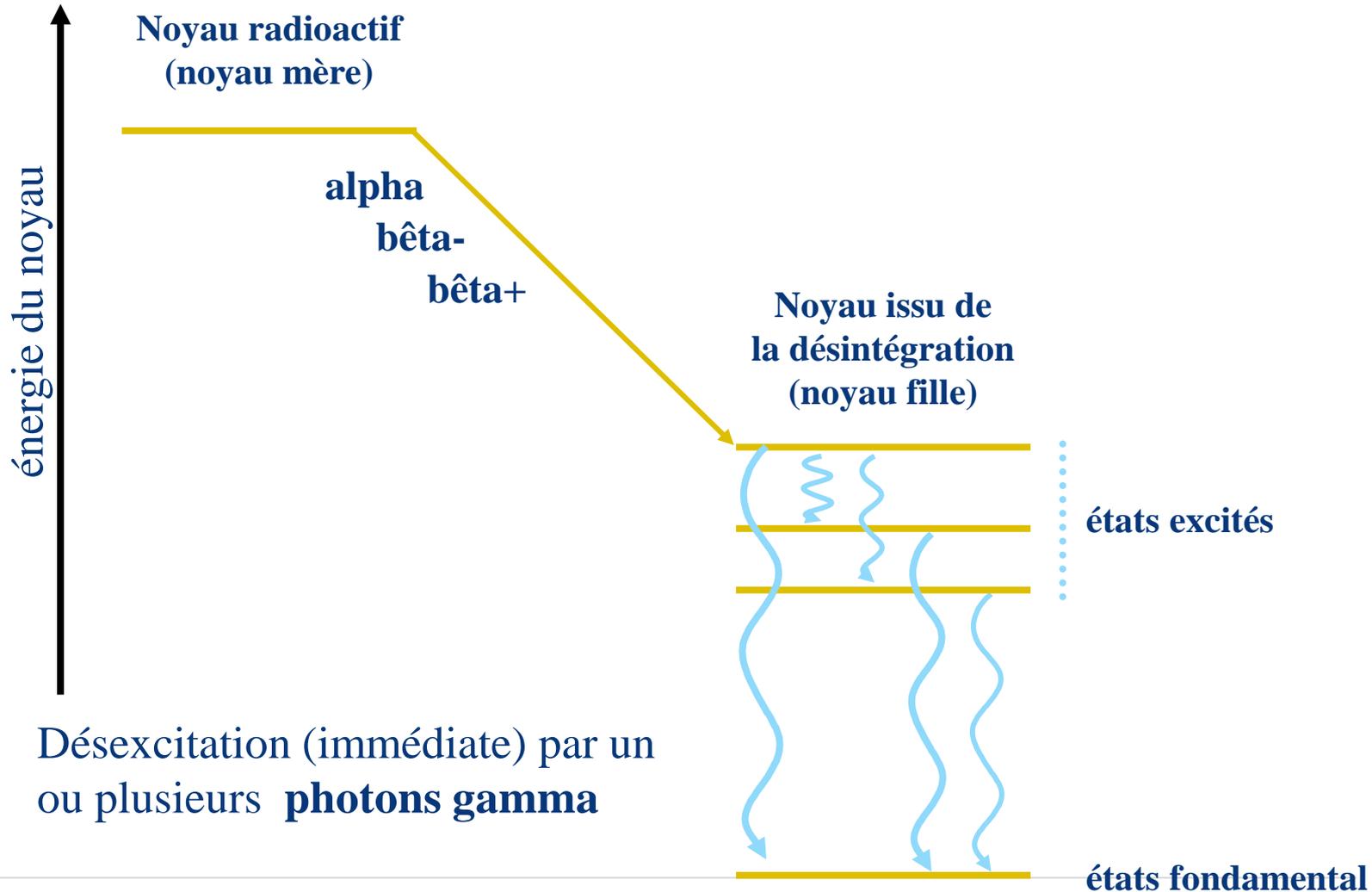


Schéma de désintégration



Définitions

Activité:

Nombre de désintégrations par seconde. Unité : **Becquerel** (Bq)

Ancienne unité (encore parfois utilisée): **Curie** (Ci)

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

Demi-vie ou période

Temps/durée nécessaire pour qu'une substance radioactive perde la moitié de son activité.

Demi-vie ou période

C'est une propriété statistique: c'est le temps au bout duquel un atome radioactif aura une chance sur deux de s'être désintégré.

Elle **ne dépend donc pas de la quantité initiale**, mais **uniquement de l'élément considéré**.

La demi-vie peut varier considérablement selon les éléments, d'une fraction de seconde à des millions ou des milliards d'années.

Krypton 89 → ~ 3 minutes

Plutonium 239 → 24 000 ans

Uranium 238 → 4,5 milliards d'années

Carbone 14 → 5730 années

Données pour la radioprotection opérationnelle, limites de libération, limites d'autorisation et valeurs directrices

Les explications concernant les différentes colonnes et les notes de bas de page sont données sous le tableau.

Nucléide	Période	Mode de désintégration / rayonnement	Grandeurs d'appréciation					LL Bq/g	Limite d'autorisation LA Bq	Valeurs directrices		Nucléide de filiation instable
			ϵ_{inh} Sv/Bq	ϵ_{ing} Sv/Bq	h_{10} (mSv/h)/ GBq à 1 m de distance	$h_{0,07}$ (mSv/h)/ GBq à 10 cm de distance	$h_{c,0,07}$ (mSv/h)/ GBq à (kBq/cm ²)			CA Bq/m ³	CS Bq/ cm ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H-3, OBT	12.32 a	β^-	4.10 E-11	4.20 E-11	<0.001	<1	<0.1	1.E+02	1.00 E+08	2.00 E+05	1000	
H-3, HTO		β^-	1.80 E-11	1.80 E-11	<0.001	<1	<0.1	1.E+02	3.00 E+08	5.00 E+05	1000	
H-3, gaz [7]		β^-	1.80 E-15		<0.001	<1	<0.1		3.00 E+12	5.00 E+09		
Be-7	53.22 d	ec / ph	4.60 E-11	2.80 E-11	0.008	<1	0.1	1.E+01	1.00 E+08	2.00 E+05	100	
Be-10	1.51 E6 a	β^-	1.90 E-08	1.10 E-09	<0.001	2000	1.6	1.E+02	3.00 E+05	4.00 E+02	3	
C-11	20.39 min	ec, β^+ / ph	3.20 E-12	2.40 E-11	0.160	1000	1.7	1.E+01	[1] 7.00E+07	7.00 E+04	[3] 3	
C-11 monoxyde			1.2 E-12						7.00E+07	7.00 E+04	[3]	
C-11 dioxyde			2.2 E-12						7.00E+07	7.00 E+04	[3]	
C-14	5.70 E3 a	β^-	5.80 E-10	5.80 E-10	<0.001	200	0.3	1.E+00	9.00E+06	1.00 E+04	30	
C-14 monoxyde			8.00 E-13						6.00E+09	1.00 E+07		
C-14 dioxyde			6.50 E-12						8.00E+08	1.00 E+06		
N-13	9.965 min	ec, β^+ / ph			0.160	1000	1.7	1.E+02	[1] 7.00E+07	7.00 E+04	[3] 3	
O-15	122.24 s	ec, β^+ / ph			0.161	1000	1.7	1.E+02	[1] 7.00E+07	7.00 E+04	[3] 3	
F-18	109.77 min	ec, β^+ / ph	9.30 E-11	4.90 E-11	0.160	2000	1.7	1.E+01	[1] 7.00E+07	7.00 E+04	[3] 3	
Na-22	2.6019 a	ec, β^+ / ph	2.00 E-09	3.20 E-09	0.330	2000	1.6	1.E-01	3.00E+06	4.00 E+03	3	
Na-24	14.9590 h	β^- / ph	5.30 E-10	4.30 E-10	0.506	1000	1.9	1.E+00	9.00E+06	2.00 E+04	3	
Mg-28 / Al-28	20.915 h	β^- / ph	1.70 E-09	2.20 E-09	0.529	2000	3.1	1.E+01	[2] 3.00E+06	5.00 E+03	3	
Al-26	7.17 E5 a	ec, β^+ / ph	1.40 E-08	3.50 E-09	0.382	1000	1.5	1.E-01	4.00E+05	6.00 E+02	3	

Iode - 131

Principales émissions

	Gamma / X		Beta (E _{max})		Electrons		Alpha	
	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%	E (keV)	%
E1	284	6	248	2	46	4		
E2	365	82	334	7	330	2		
E3	637	7	606	90				
% omis		11		1		2		

Seuils d'exemption

Quantité en Bq	$1 \cdot 10^4$
Concentration en Bq g ⁻¹	$1 \cdot 10^2$
Transport (Bq)	
A1	$3 \cdot 10^{12}$
A2	$7 \cdot 10^{11}$

Exposition externe (µSv.h⁻¹) pour une activité de 1 Bq

Source ponctuelle

ds $8,6 \cdot 10^{-5}$ β et e⁻
ds $7,5 \cdot 10^{-7}$ γ et X
dp $7,3 \cdot 10^{-7}$ γ et X

flacon 10 ml
6,4 · 10⁻⁶
au contact 2,8 · 10⁻⁴

bécher 50 ml au col 6,5 · 10⁻⁴
au contact 2,2 · 10⁻⁴

Seringue 5 ml
au contact 1,1 · 10⁻³

Contamination de la peau
dépôt uniforme (1 Bq · cm⁻²) 1,6
goutte de 0,05 ml (1 Bq) 5,7 · 10⁻³

Exposition interne pour les travailleurs

Dose efficace engagée par unité d'incorporation en Sv · Bq⁻¹

Inhalation	R	higi	
		1 µm	5 µm
Tous composés	M'	1 µm	$7,6 \cdot 10^{-9}$
		5 µm	$1,1 \cdot 10^{-8}$
		1 µm	
	L	5 µm	
		1 µm	
	V	5 µm	$2,0 \cdot 10^{-9}$
	V	1 µm	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Iode élémentaire			
Iodure de méthyle			
Ingestion			
	I _g	e _g	
Tous composés	1,000	$2,2 \cdot 10^{-8}$	

Données pratiques

Débit de dose efficace par immersion ⁽¹⁾	$7,6 \cdot 10^{-7} \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ par Bq · m ⁻²	LPCA ⁽²⁾	$4,2 \cdot 10^7 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$
---	---	---------------------	---

Organe exposé contribuant le plus à la dose efficace
Inhalation : Thyroïde (R et vapeurs)
Ingestion : Thyroïde

Al₂inhalation (Bq)⁽²⁾ : $1,0 \cdot 10^6$

Al₂injection (Bq)⁽²⁾ : $9,1 \cdot 10^5$

(1) Calculé dans un volume de 100 ml.
(2) Valeurs les plus restrictives.
(3) La LPCA prend en compte l'exposition par inhalation et par immersion.



Écrans, détection, contamination des surfaces

Parcours β et e ⁻ (mm)	
Verre	0,9
Plexiglas	1,6



Plan 5 m x 5 m uniformément contaminé (1 Bq · cm⁻²)
Débits de dose (µSv · h⁻¹)^m

à 1 m	ds β, e ⁻ : $1,5 \cdot 10^{-3}$
	ds γ, X : $4,6 \cdot 10^{-2}$
	dp γ, X : $4,5 \cdot 10^{-2}$
à 10 cm	ds β, e ⁻ : $7,4 \cdot 10^{-1}$
	ds γ, X : $1,4 \cdot 10^{-2}$
	dp γ, X : $1,4 \cdot 10^{-2}$

Limites pratiques
LPC_β : $2 \cdot 10^3 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$
LPC_γ : $2 \cdot 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$

1) Si aucune sonde n'est prioritaire, faire un frottis et le mesurer en laboratoire.
2) Attention ! Toute contamination surfacique labile doit être éliminée.

Activités maximales manipulables (Bq)

État physico-chimique	coefficient de volatilité (k)	Sous réserve de respecter les LIMITES D'EXPOSITION EXTERNE			
		Zone Surveillance (ZS)		Zone Contrôlée (ZC)	
		Paillasses	Hotte ventilée	Hotte ventilée	Boîte à gants
Tous composés	0,01	$3,2 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
Forme volatile (Iode élémentaire)	1	interdit	$3,1 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$
Forme volatile (Iodure de méthyle)	1	interdit	$4,1 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$

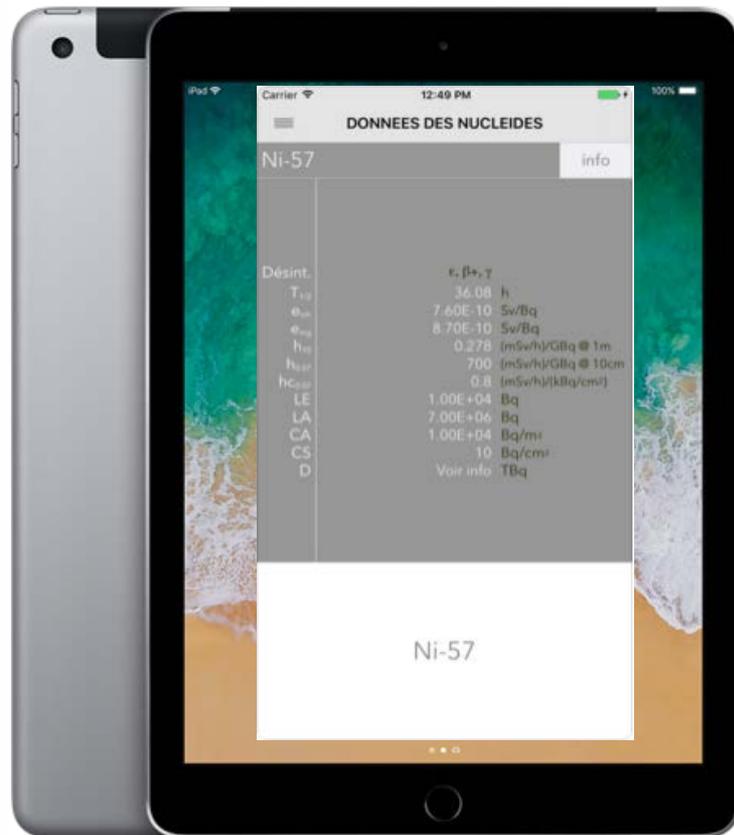


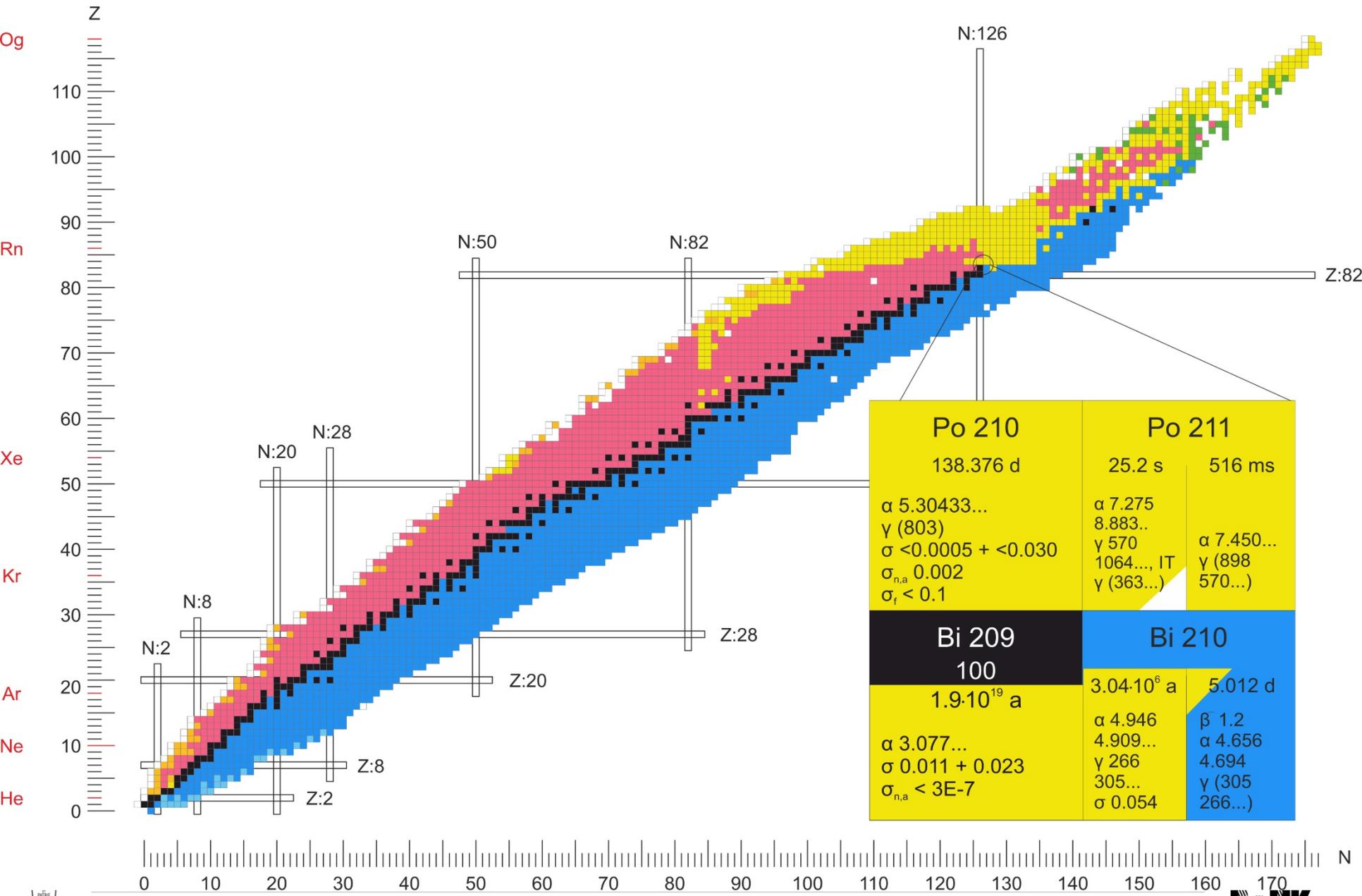
Aperçu App Store

Cette app est uniquement disponible dans l'App Store pour les appareils iOS.



NuklidCalc 6+
NP Tech
Gratuit





Désintégration

- Évolution du nombre de noyaux (N) d'une source radioactive

$$dN(t) = -\lambda N(t) dt \quad \Rightarrow \quad \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t)$$

- Équation différentielle de la désintégration

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Décroissance exponentielle}$$

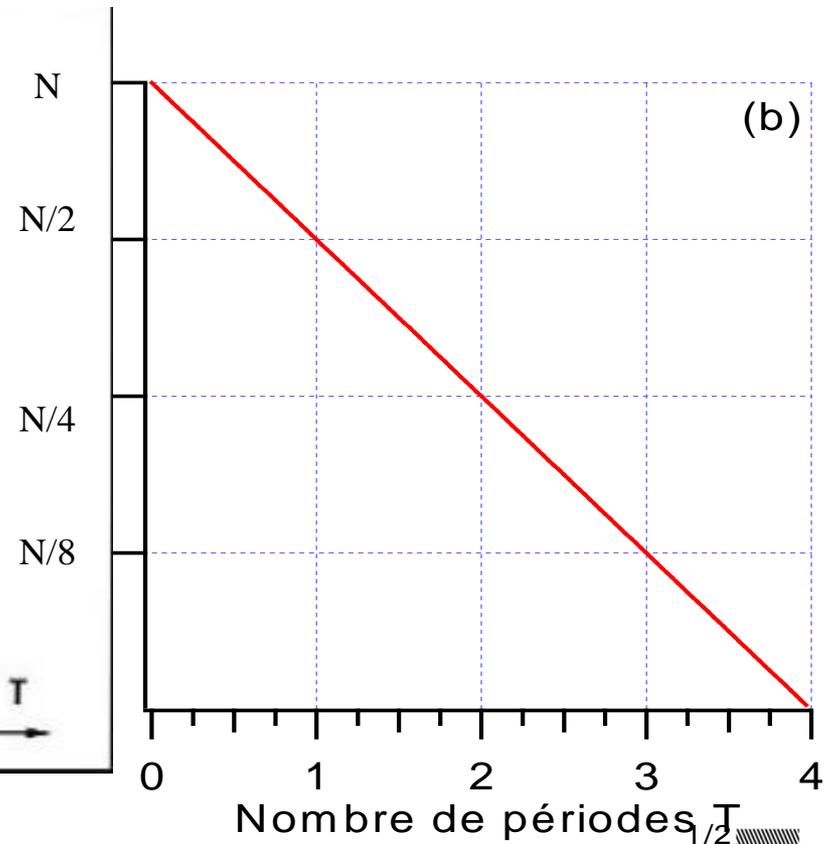
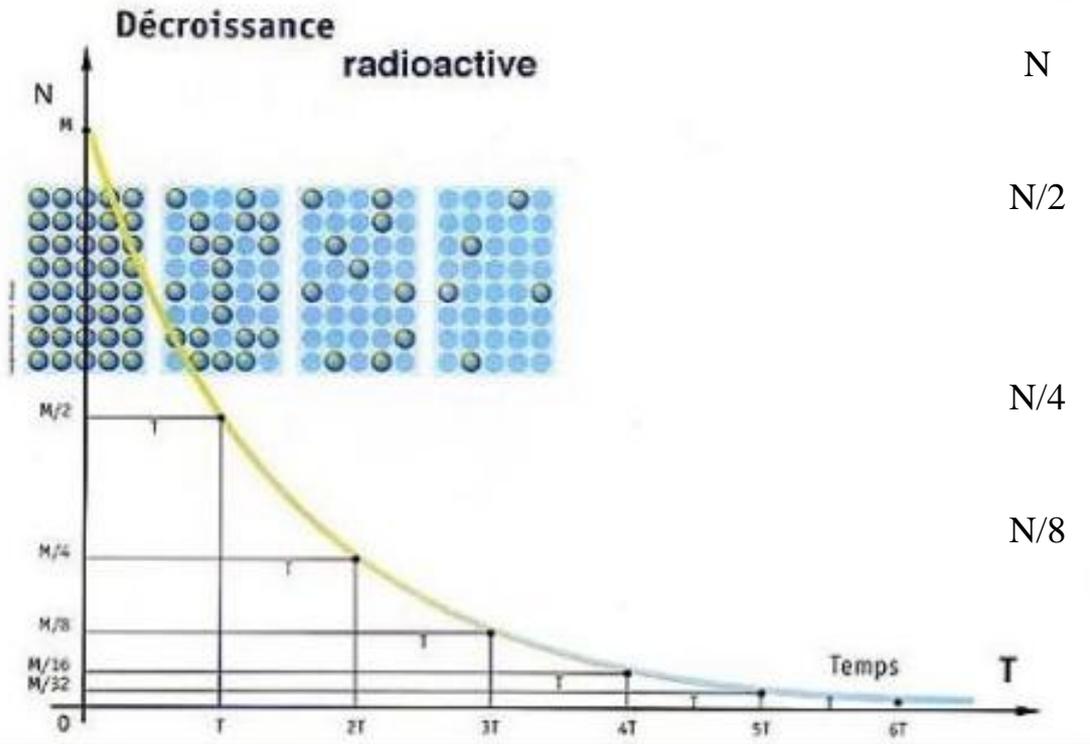
Période radioactive (ou demi-vie)

Temps au cours duquel le nombre de noyaux a diminué d'un facteur 2

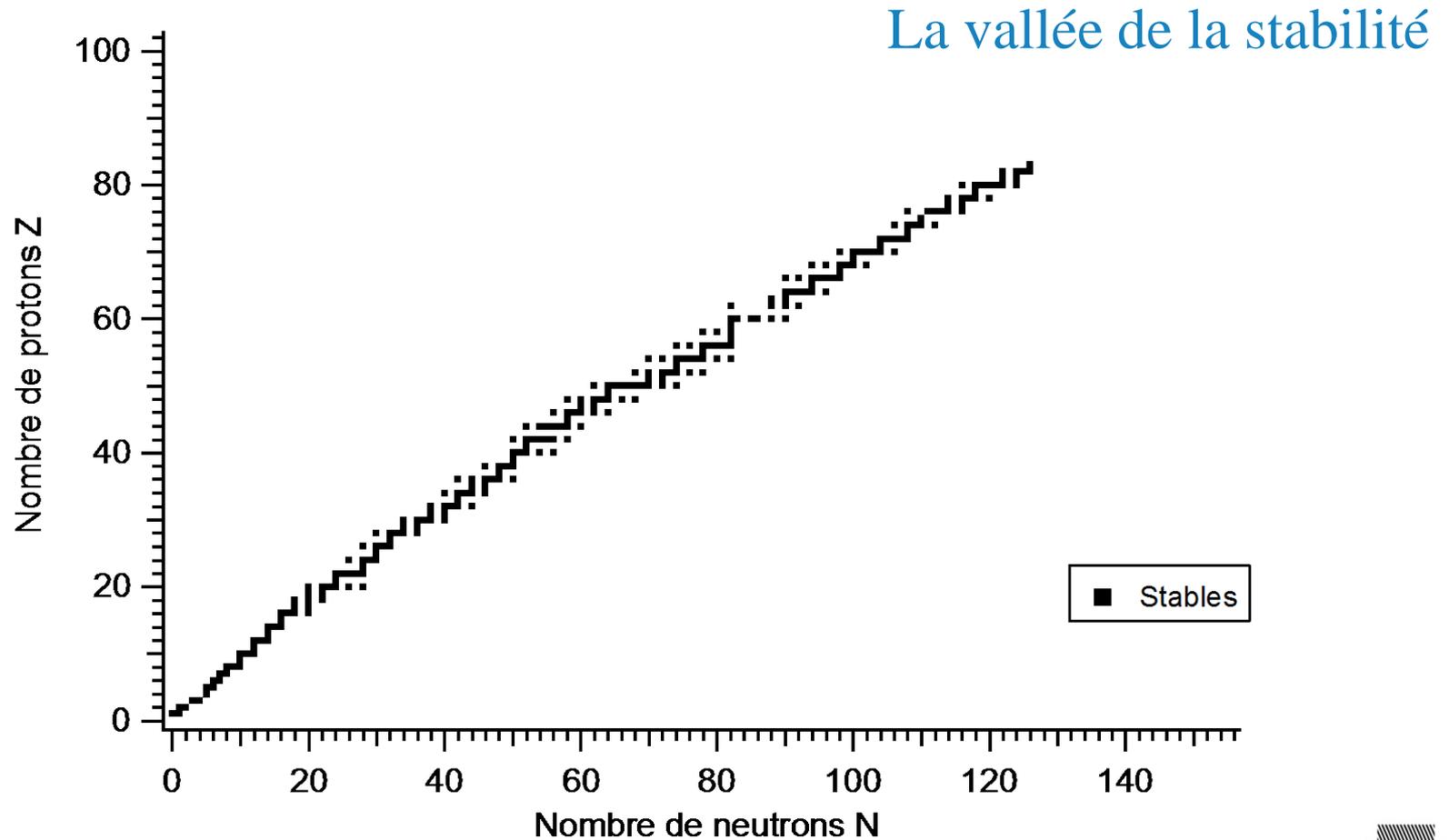
$$N(T) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

- T inversement proportionnel à λ
- T constante, spécifique au nucléide
- Chaque période T correspond une diminution du nombre de noyaux radioactifs d'un facteur 2

Période radioactive (ou demi-vie)

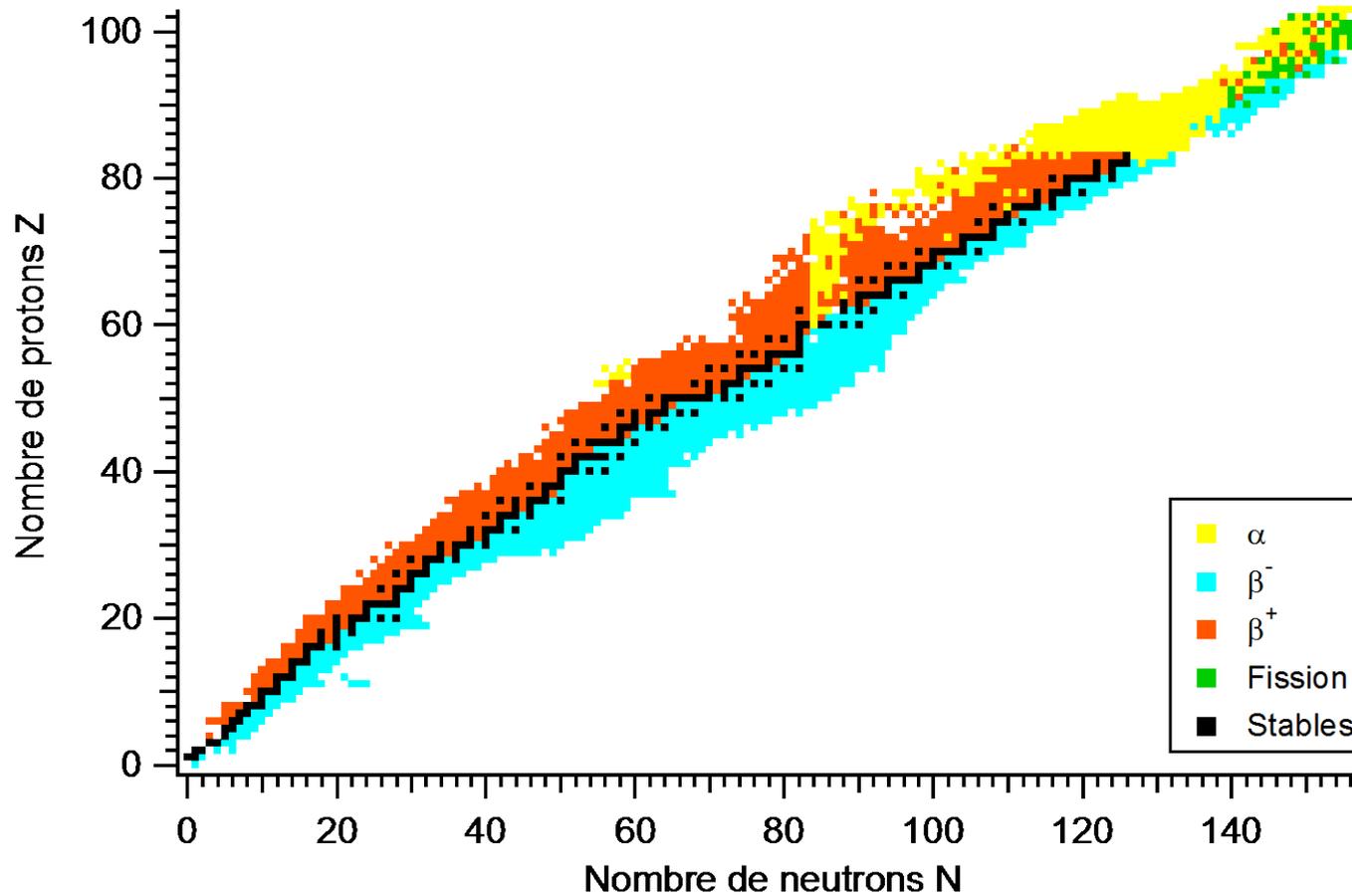


Stabilité des noyaux

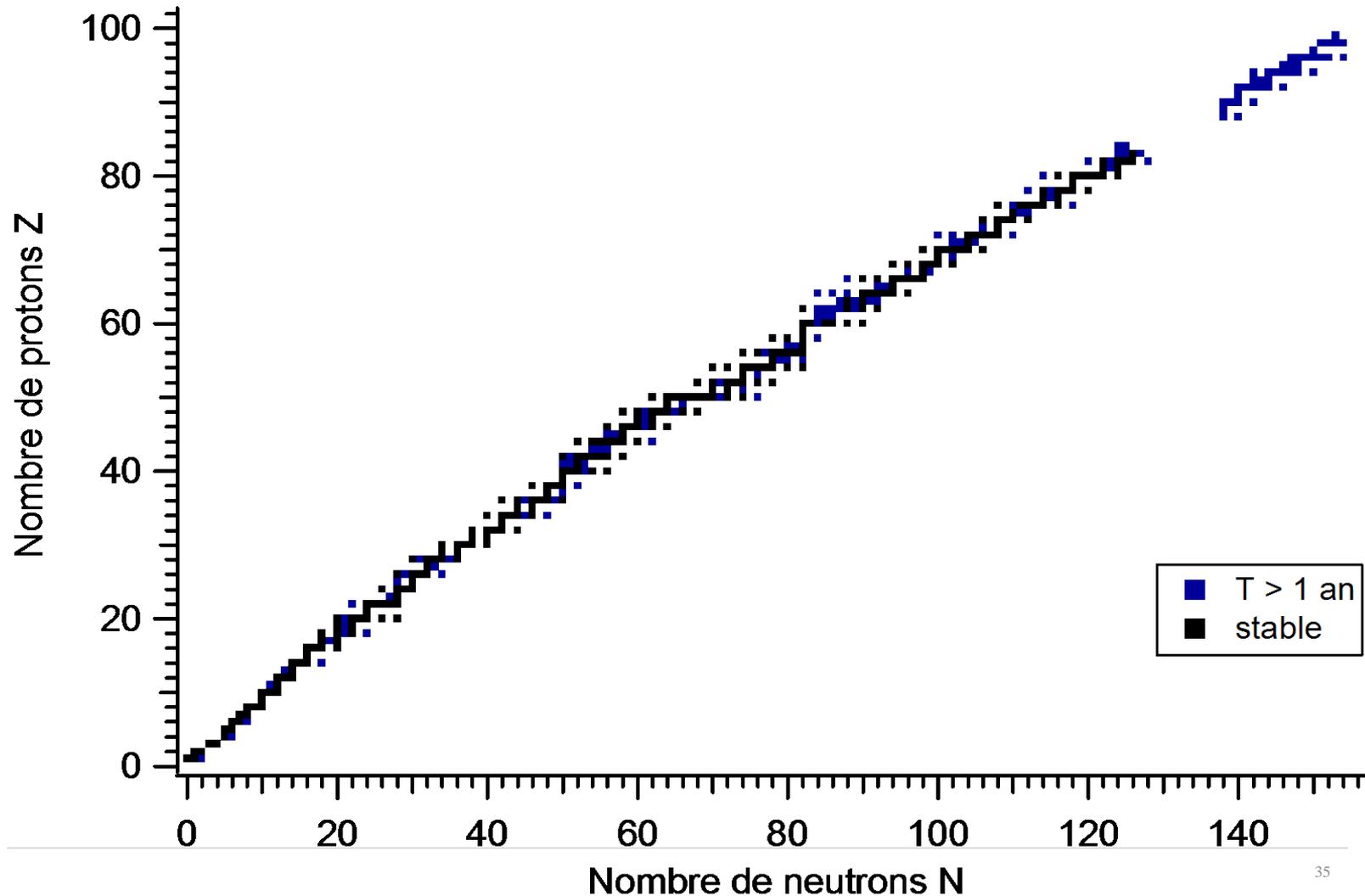


Stabilité des noyaux

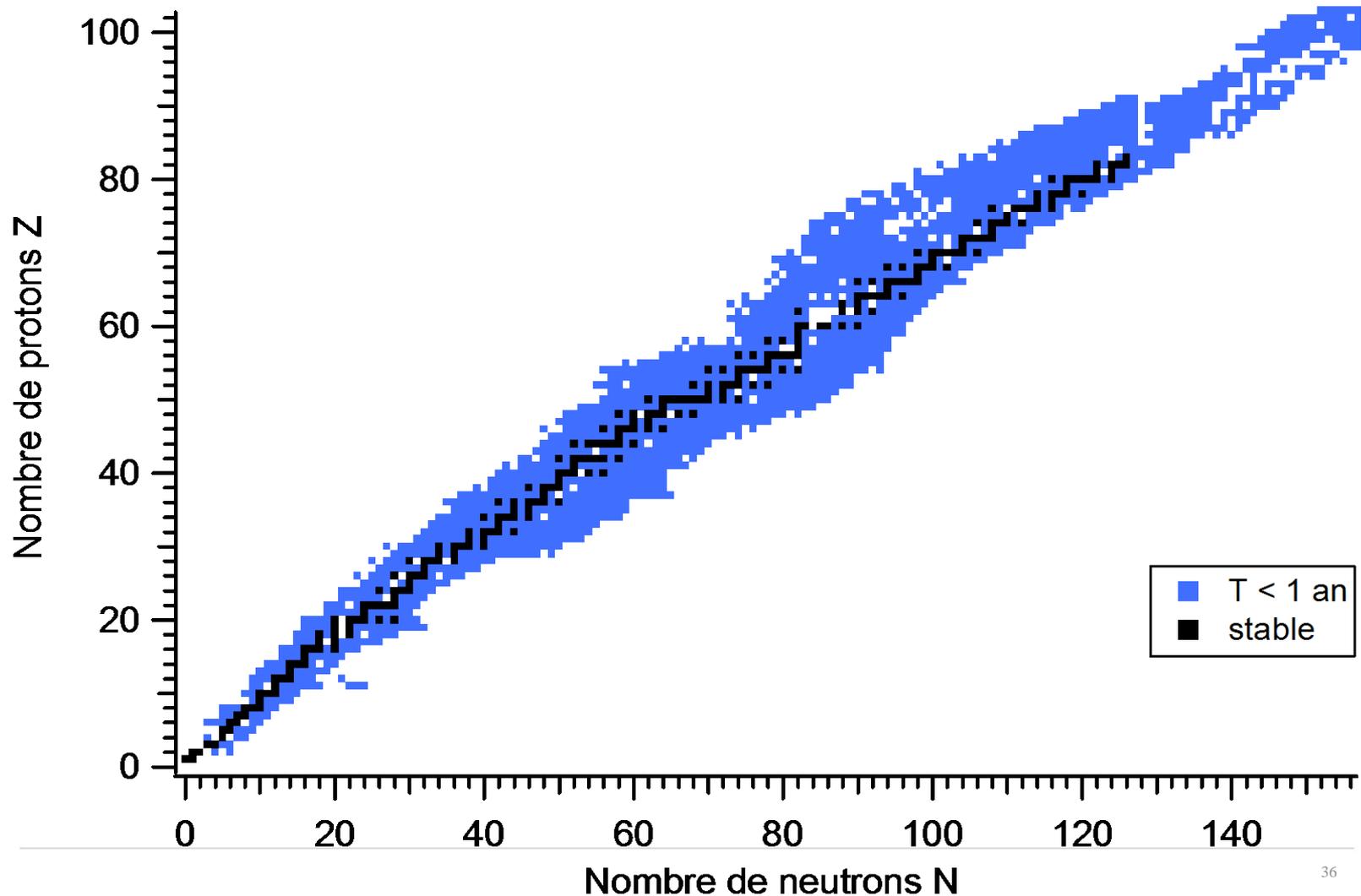
Les bords de la vallée sont peuplés de noyaux instables



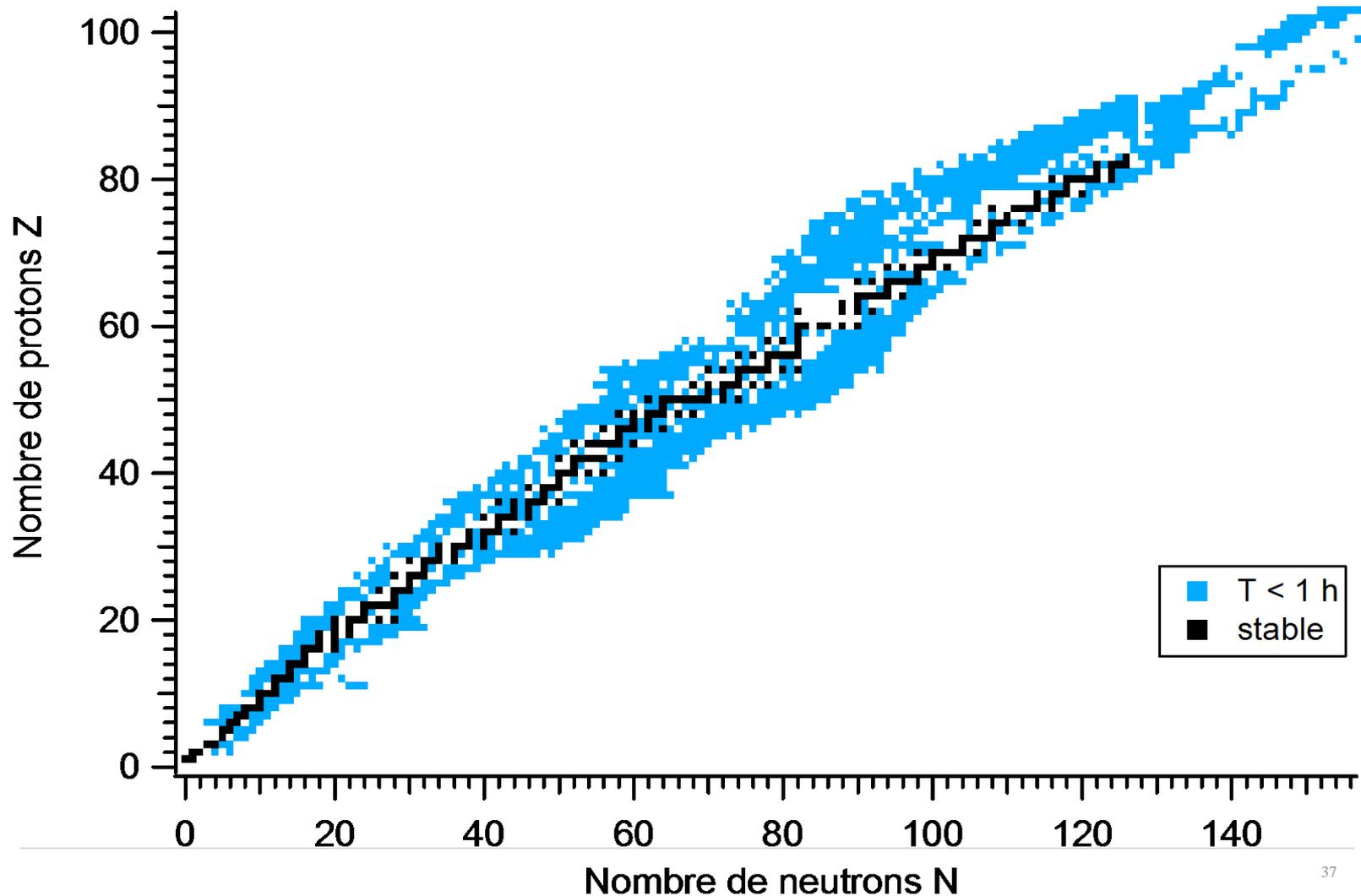
Stabilité des noyaux



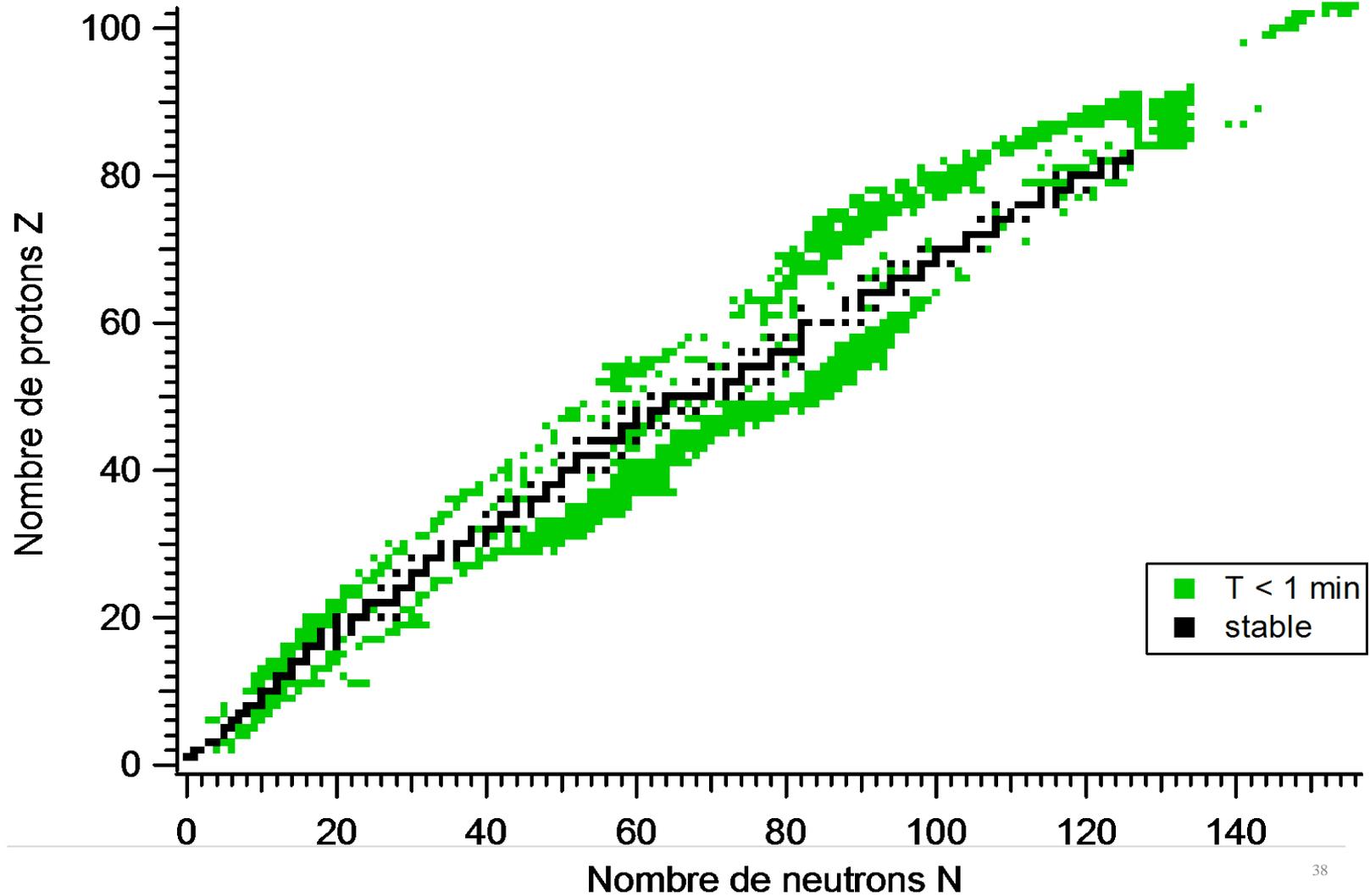
Stabilité des noyaux



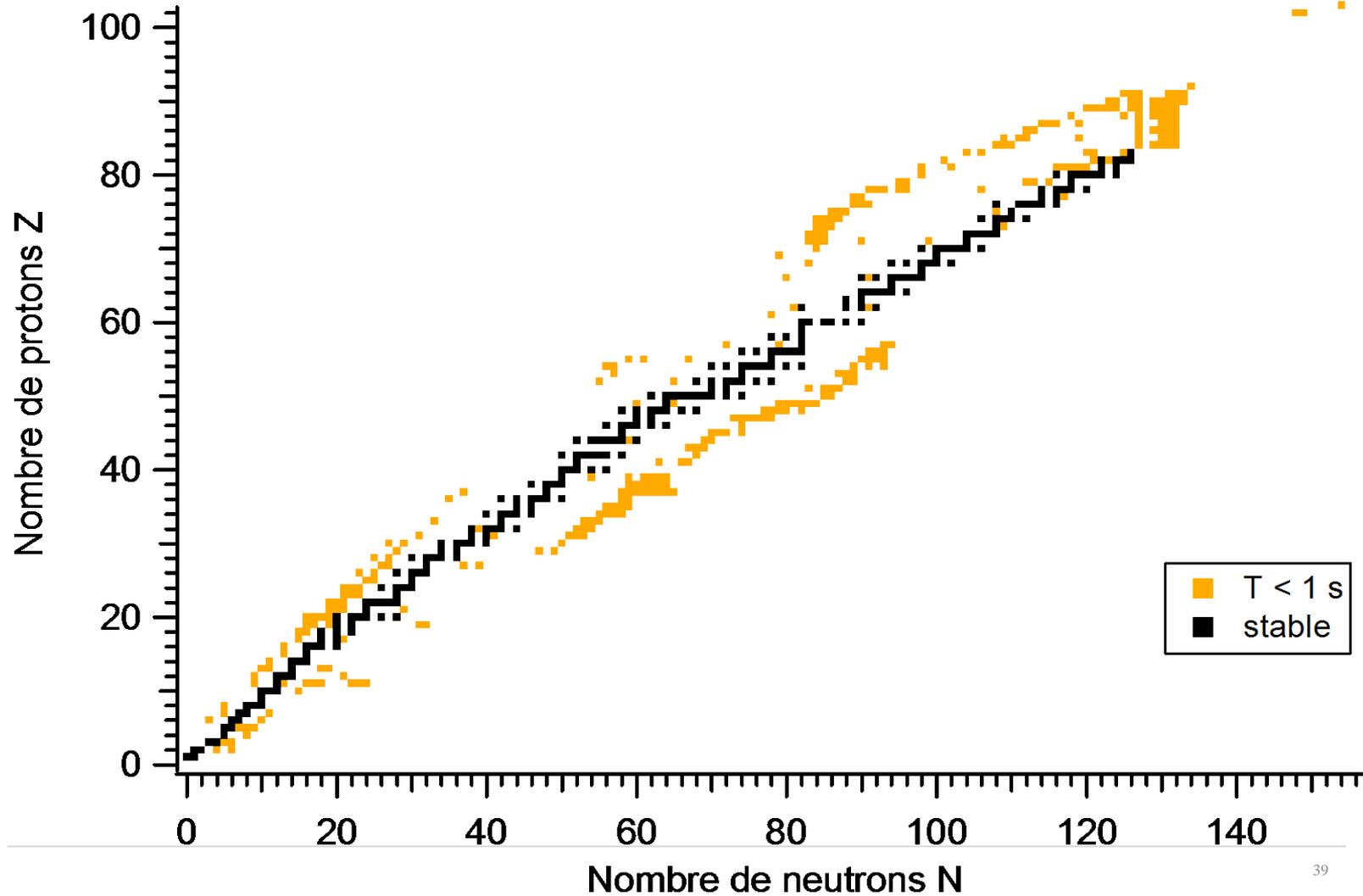
Stabilité des noyaux



Stabilité des noyaux

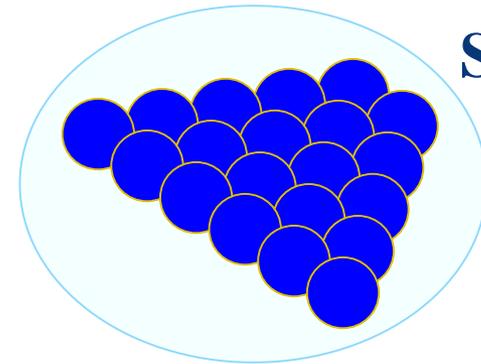


Stabilité des noyaux



Activité

Nombre de désintégrations par unité
de temps
(plus facile à mesurer)



Source

Activité : A

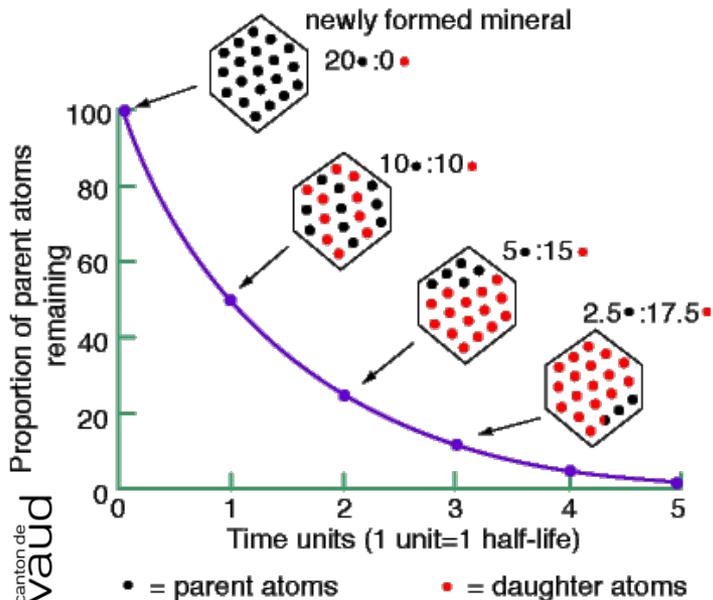
N noyaux instables
(difficile à mesurer)

$$A = \lambda N$$

λ : probabilité de
désintégration

Activité

- Activité
 - Nombre de désintégrations par unité de temps
 - Unité : $s^{-1} = \text{Bq} = \text{becquerel}$
- A évolue dans le temps comme N
 - Décroissance exponentielle avec période T



$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln 2 t}{T}}$$

Activité

- Exemple
 - On veut injecter au patient 800 MBq de Tc-99m à 10:00
 - Quelle activité faut-il prélever du flacon à 8:00 ?
 - Période du Tc-99m : 6 heures

solution

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\ln 2 t}{T}}$$

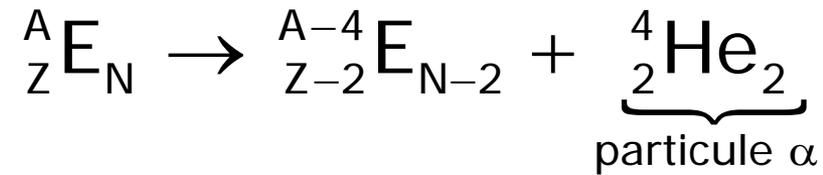
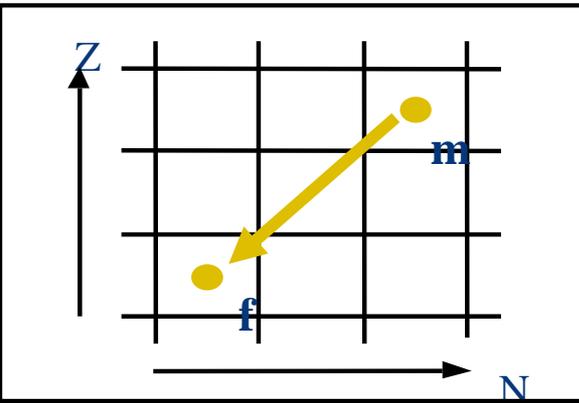
$$t = -2\text{h}$$

$$A_0 = 800 \text{ MBq}$$

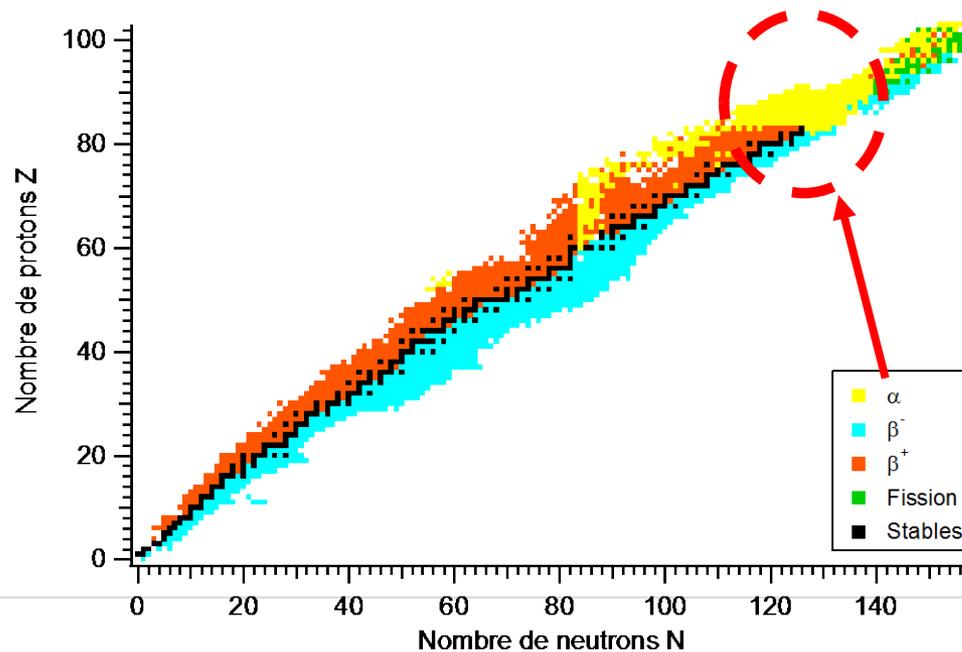
A est recherché

$$\begin{aligned} A(-2) &= A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot t}{T}} = 800 \cdot e^{-\frac{\ln 2 \cdot (-2)}{6}} \\ &= 800 \cdot 1.26 = \underline{\underline{1008 \text{ MBq}}} \end{aligned}$$

Lecture du tableau des nucléides



Ejection d'un **noyau d'hélium** :
2 neutrons + 2 protons

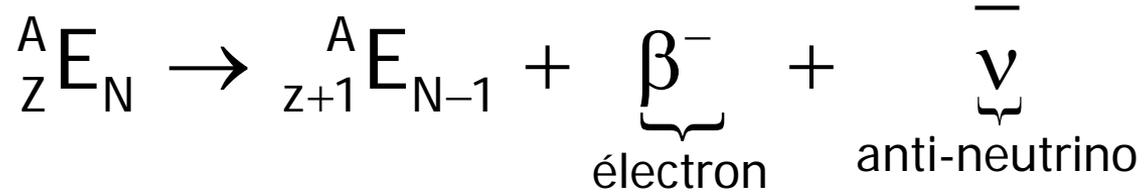
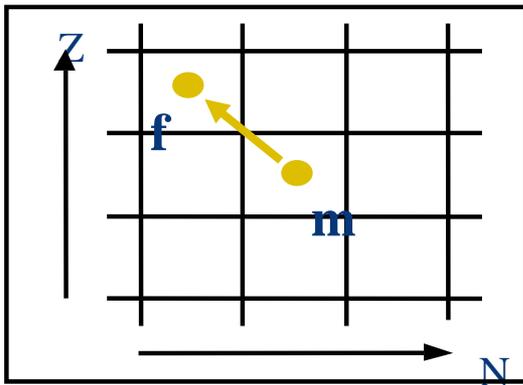


Rn-222

Am-241

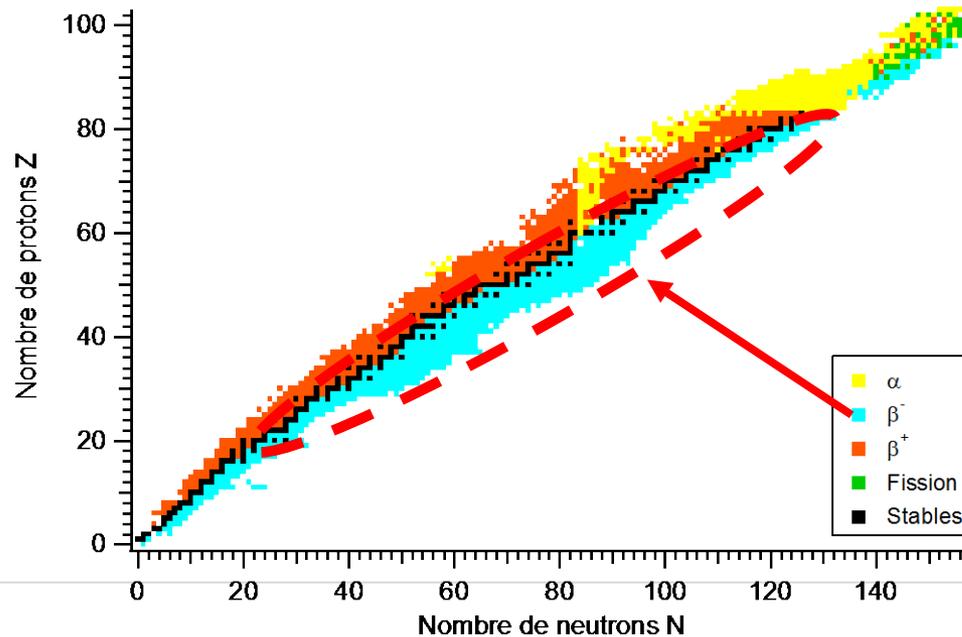
U-238

Lecture du tableau des nucléides

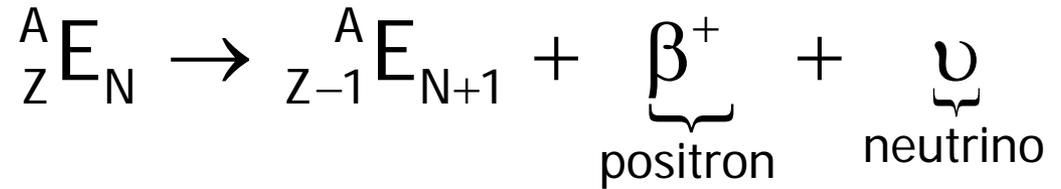
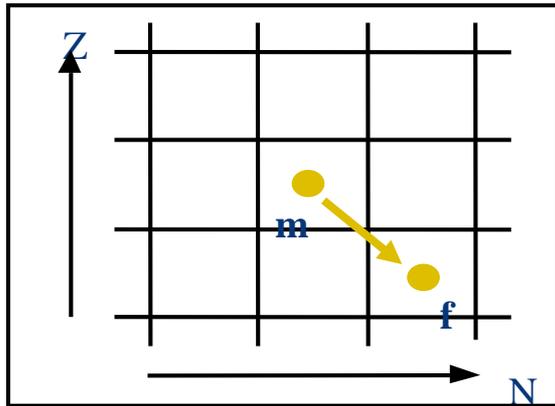


Noyaux initial et final **isobares** (même A)

Neutron transformé en **proton**

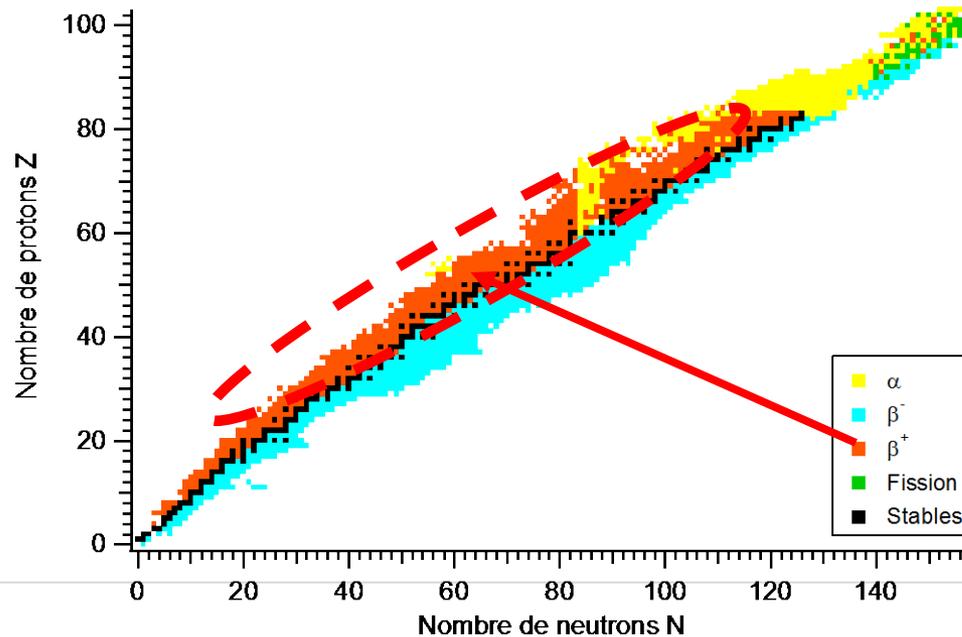


Lecture du tableau des nucléides



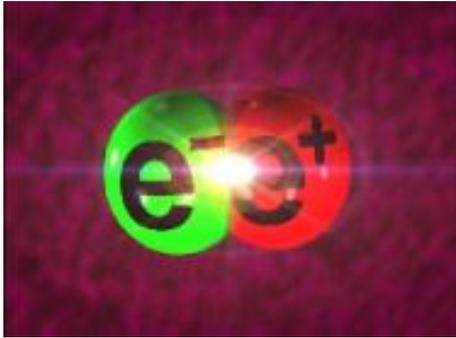
noyaux initial et final **isobares** (même A)

Proton transformé en **neutron**

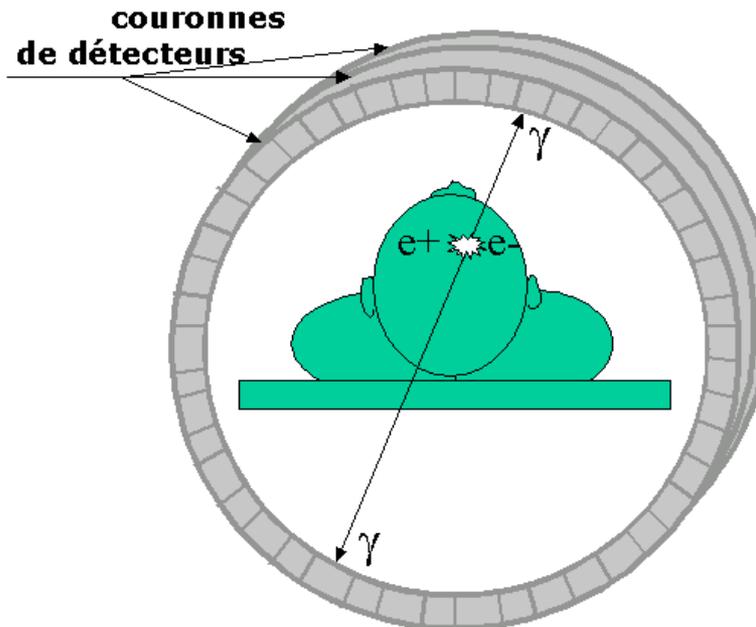


${}^{11}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$,
 ${}^{18}\text{F}$, ${}^{124}\text{I}$

Annihilation $e^+ e^-$



- Positron freiné dans la matière
- A faible vitesse : annihilation avec électron
- Résultat : 2 photons de 511 keV à 180°
- Application : PET en médecine nucléaire



Fission

La fission est provoquée par la capture d'un neutron dans un petit nombre de **noyaux très lourds**, appelés fissiles, **fragilisés** par un trop grand nombre de nucléons. Ces noyaux très volumineux se **scindent** alors en noyaux plus stables, libérant de l'énergie.

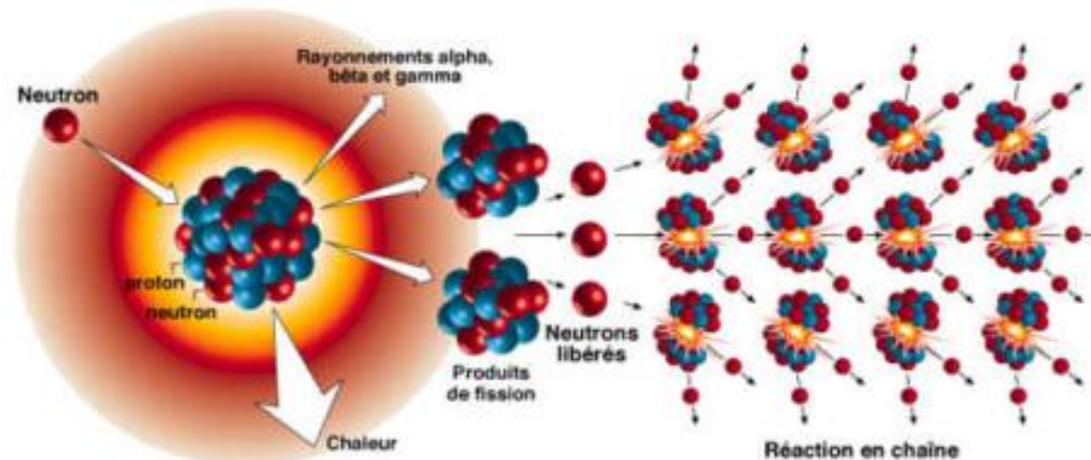
Noyau fissile naturel : U-235

Autres noyaux fissiles : il faut les produire dans les réacteurs

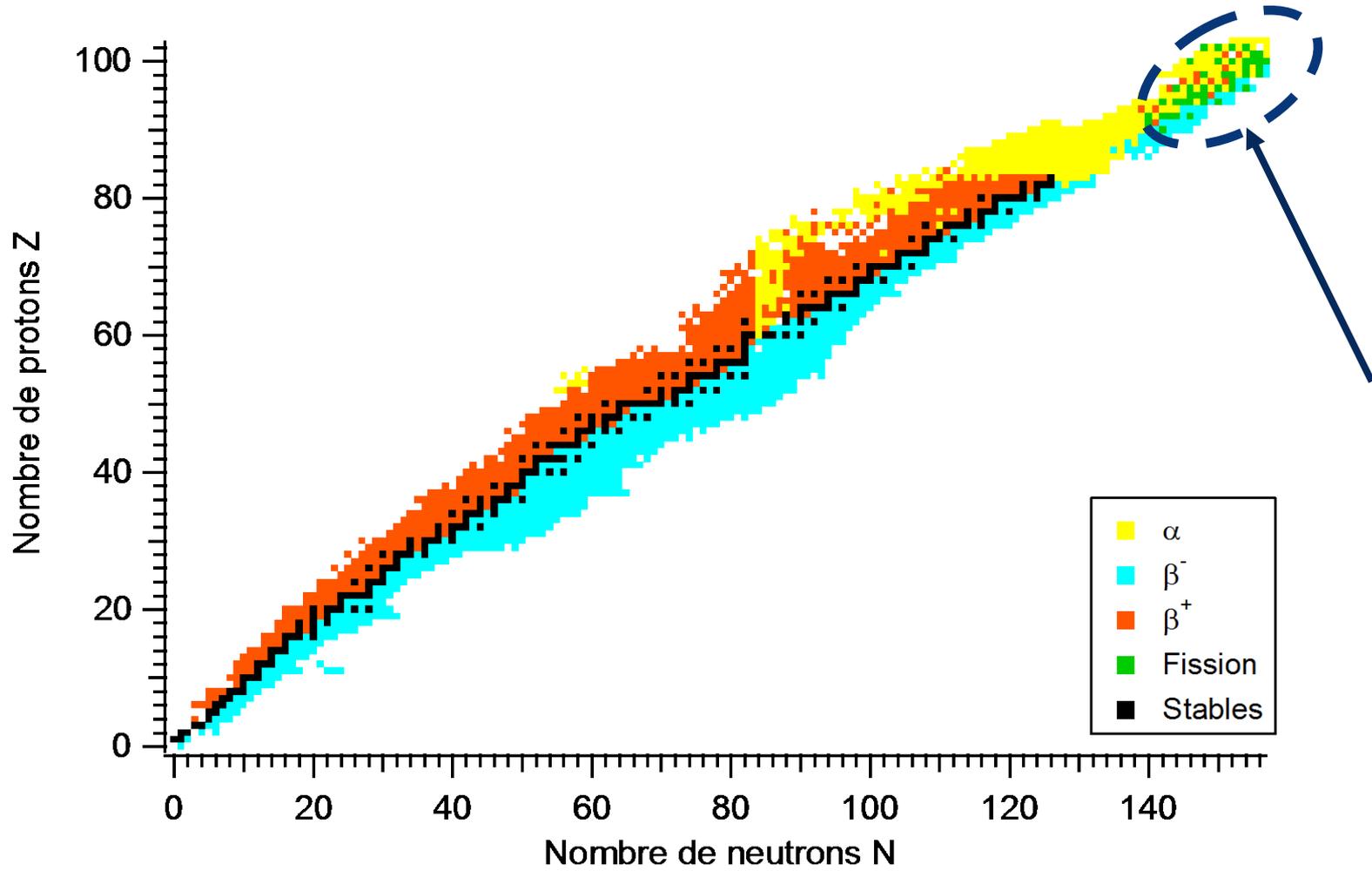
Pu-239

U-233

L'arrivée d'un neutron « intrus » de faible énergie dans un noyau fissile génère une excitation qui suffit pour déclencher la fission. Le noyau se **déforme**, puis se **scinde** en **deux fragments** le plus souvent de taille inégale.



Fission



Spallation

La **spallation** vient de l'anglais *to spall* (produire des éclats) est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau atomique est frappé par une particule incidente et produit des jets de particules plus légères

spall

Prononciation: /spôl/  



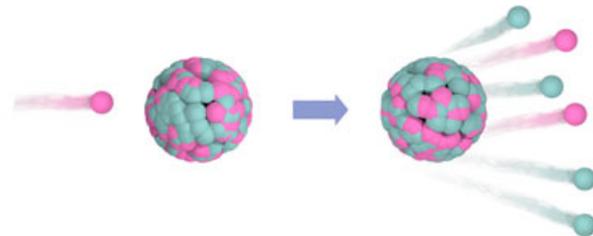
oxforddictionaries.com

VERBE

[WITH OBJECT]

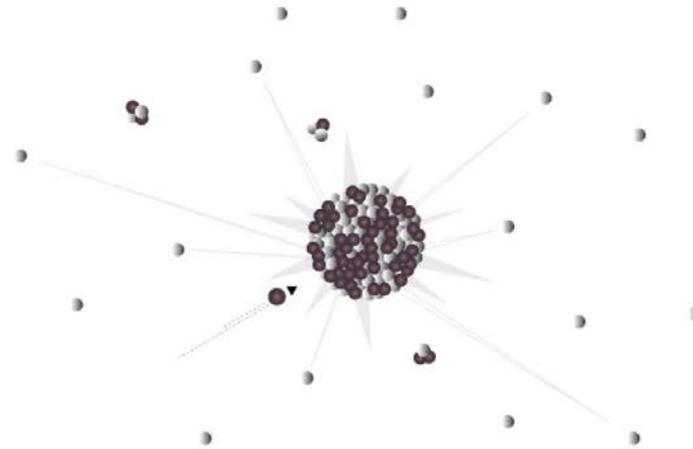
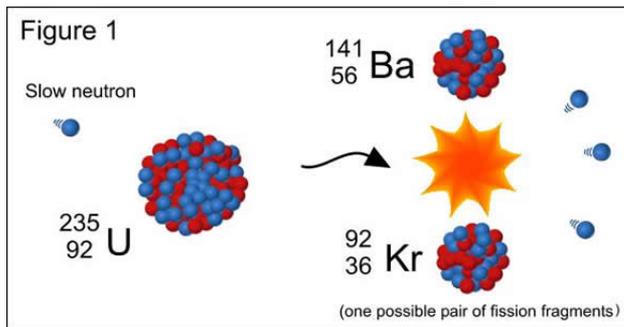
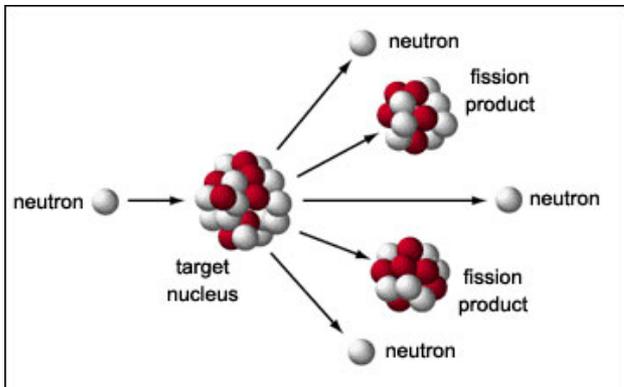
1 Break (ore, rock, stone, or concrete) into smaller pieces, especially in preparation for sorting.

1.1 [NO OBJECT] (Of ore, rock, or stone) break off in fragments:
'cracks below the surface cause slabs of material to spall off'



Fission — partage du noyau en deux parties de dimensions semblables

Spallation — émission de petites particules, laissant un noyau résiduel relativement



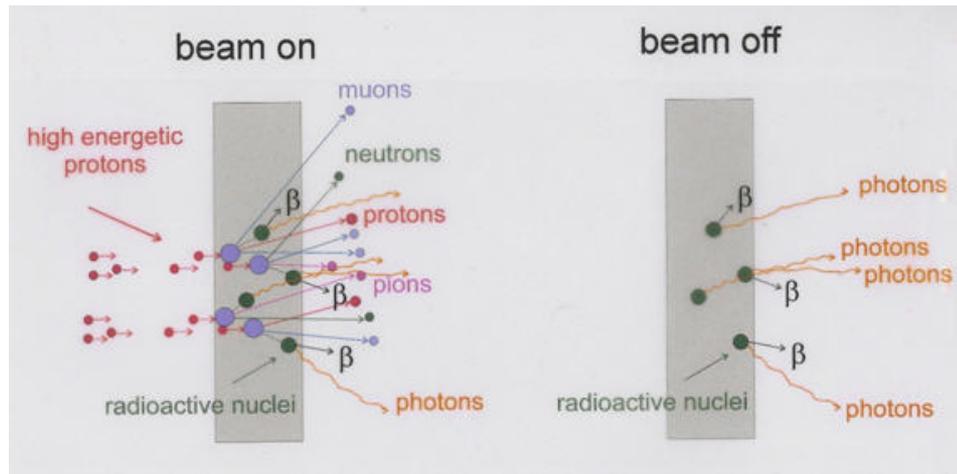
Spallation

Fission

Activation

Transformation d'un atome non radioactif en atome radioactif suite à une irradiation

L'**activation neutronique** est l'activation de matériel par exposition à un flux neutronique qui induit de la radioactivité dans les matériaux



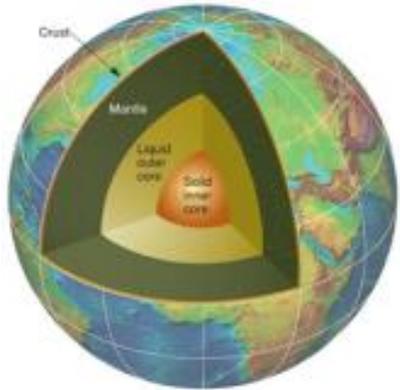
Champs de
rayonnements
instantanés

Radioactivité induite

Sources de radiation

Que connaissez-vous ???

Radioactivité terrestre



Radioéléments présents dans la croûte terrestre depuis la formation de notre planète
Age de la terre : ~4,5 milliards d'années

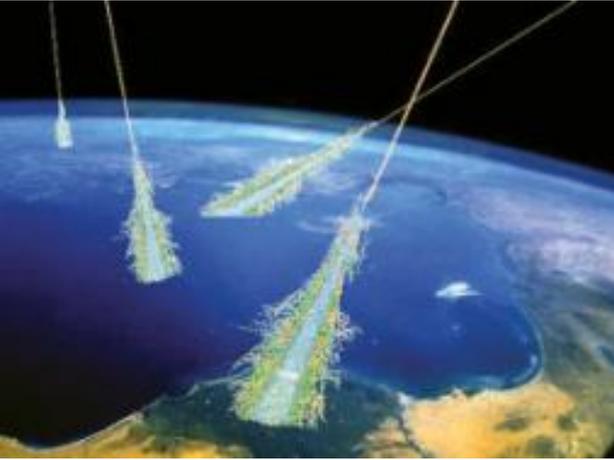
U-238 a une période de $4.9 \cdot 10^9$ ans, Th-232 de $1.4 \cdot 10^{10}$ ans



Radon

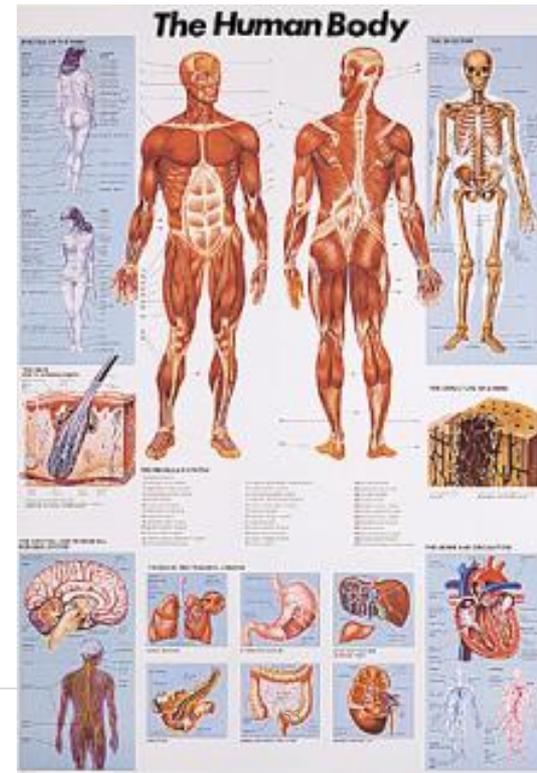
C'est un gaz rare radioactif, d'origine naturelle, qui est formé par la désintégration du radium (dans la chaîne de désintégration de l'uranium)

Présence quotidienne de la radioactivité



Radioactivité induite par le rayonnement
cosmique:
C-14 et tritium

Radioactivité présente dans le corps humain :
Potassium K40

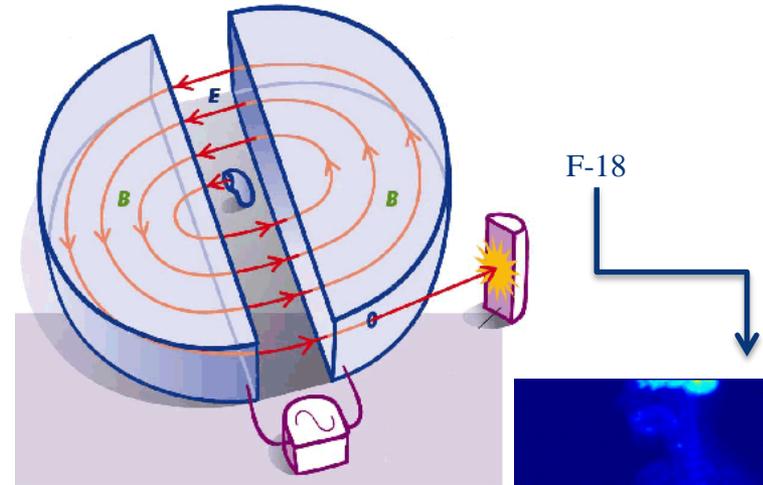


Présence quotidienne de la radioactivité

Radioactivité artificielle

Activation par bombardement avec des particules de haute énergie

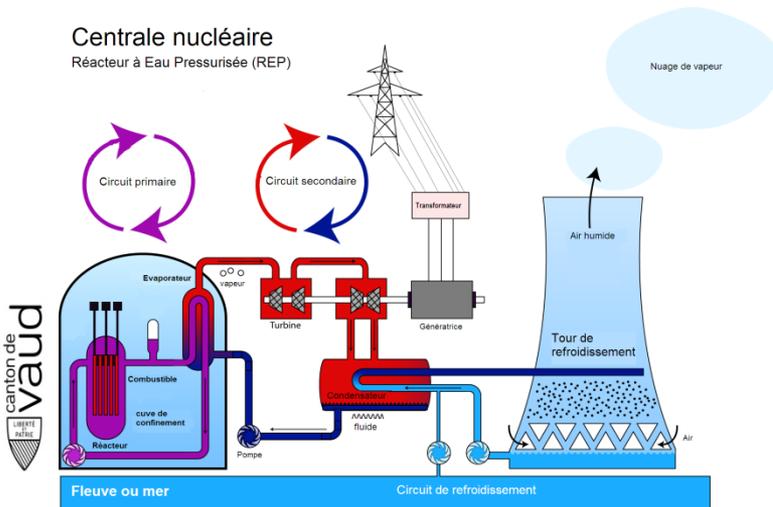
Exemple : médecine nucléaire



Fission de noyaux d'atomes lourds

Centrales nucléaires

Centrale nucléaire
Réacteur à Eau Pressurisée (REP)

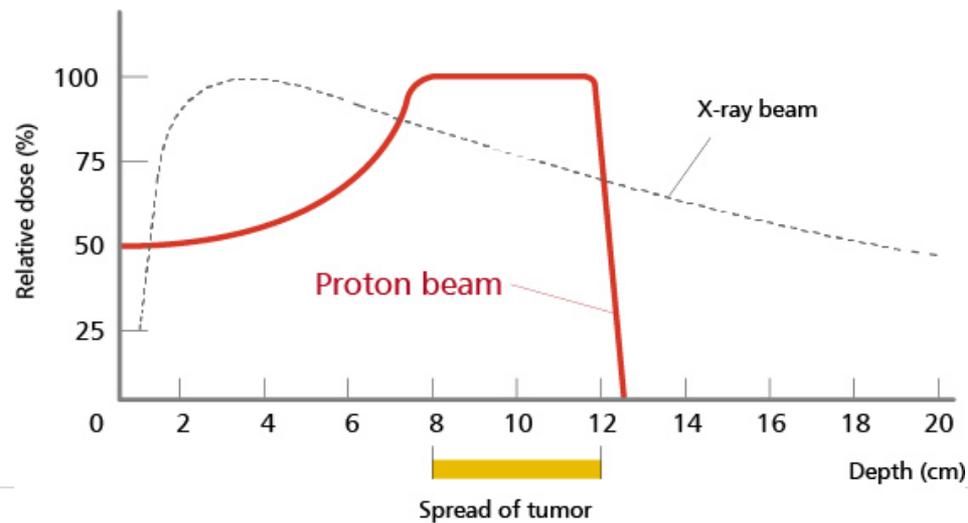


INTERACTION AVEC LA MATIÈRE

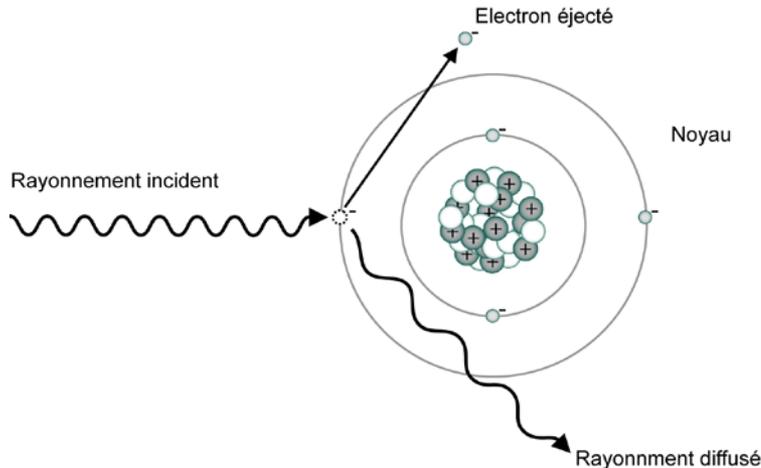
Objectifs

Décrire le parcours des particules chargées dans la matière.

Décrire le comportement des radiations ionisantes dans la matière.



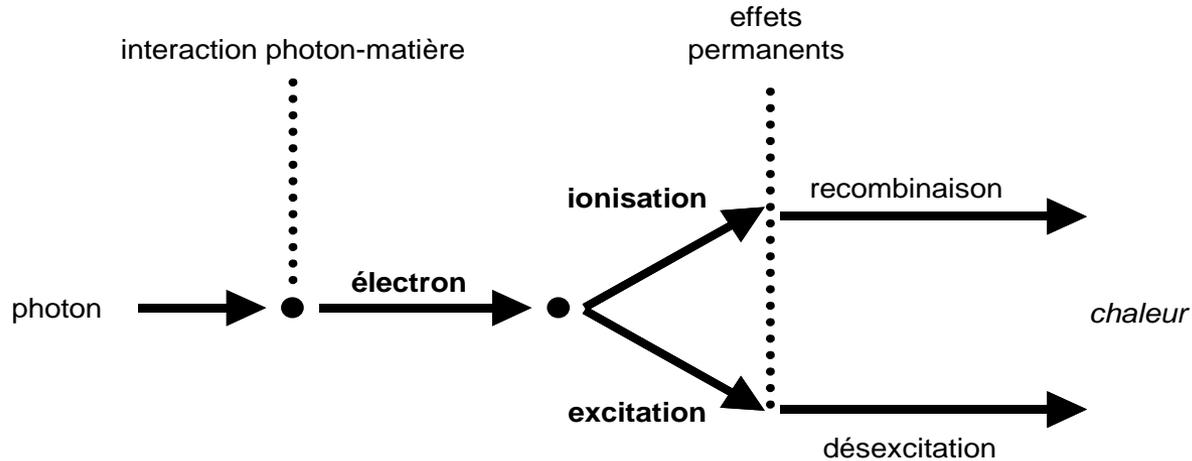
Interaction avec la matière



Lorsque des radiations ionisantes traversent la matière, elles agissent sur les atomes, principalement en leur arrachant des électrons (ionisation). Ces électrons à leur tour ionisent d'autres atomes autour desquels ils sont capturés.

Au cours de ces mécanismes la radiation perd son énergie, qui est transférée à la matière. Ce transfert d'énergie conduit en définitive à un chauffage de la matière. Toutefois l'impact principal de la radiation sur la matière n'est pas dû à l'échauffement, conduisant à de très faibles élévations de température, mais à l'ionisation des atomes qui modifie leurs caractéristiques chimiques.

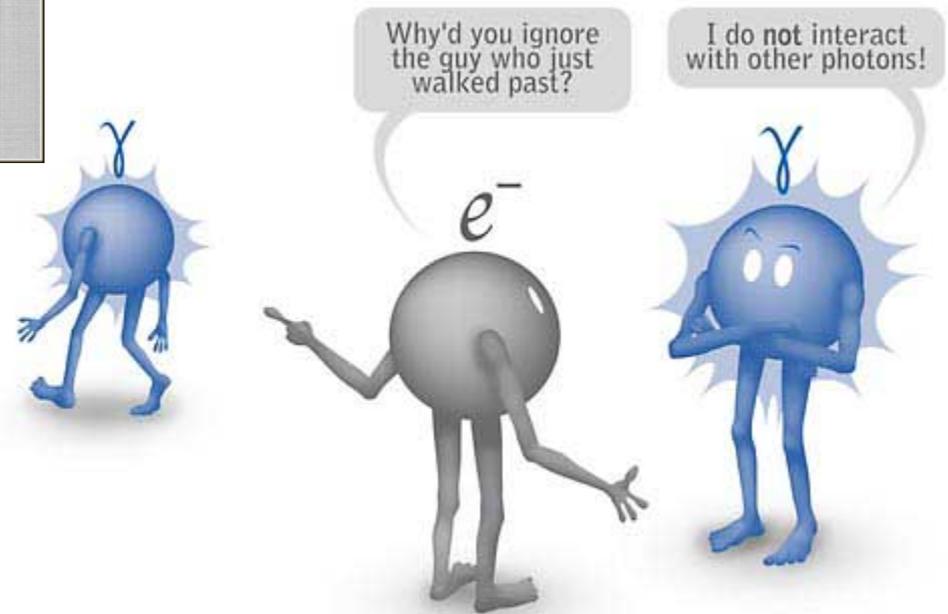
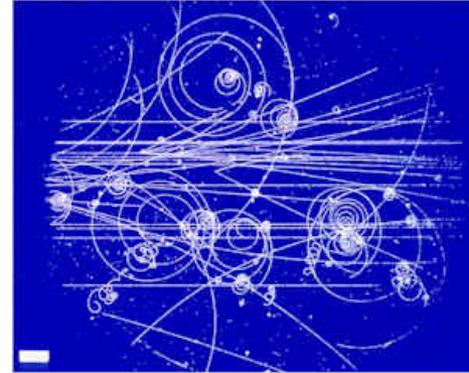
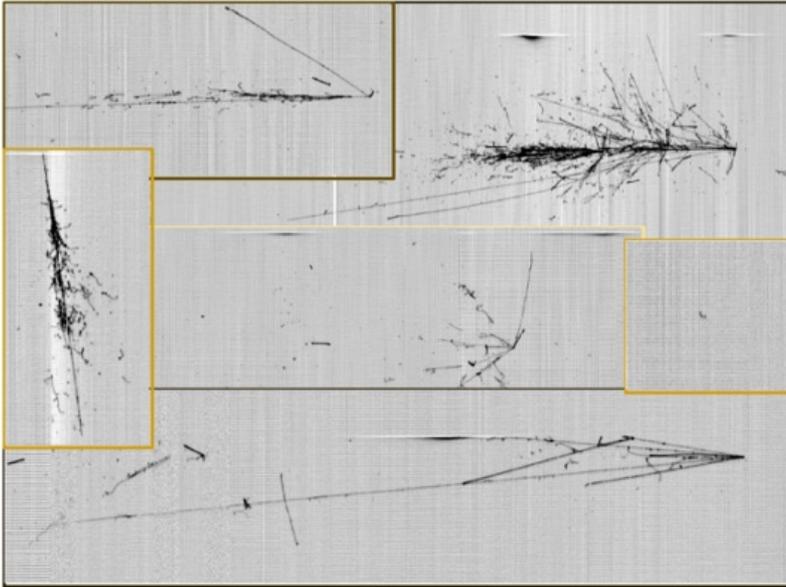
Interaction avec la matière



L'énergie se transforme alors en énergie thermique (chaleur), ce qui conduit à une très légère augmentation de la température. L'énergie qui n'est pas transformée en chaleur peut alors conduire à des effets permanents caractérisés par des modifications chimiques ou biologiques.

un rayonnement de photons est qualifié *d'indirectement ionisant*

Interaction avec la matière

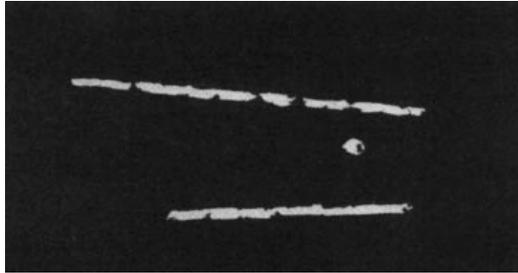


Interaction avec la matière

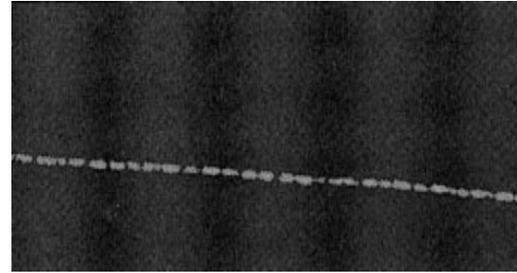
	Particules chargées	Particules non chargées
Exemple typique	Electrons, protons, α	Neutrons, RX, γ
Freinage	Continu	Mécanisme aléatoire
Fréquence des interactions	Beaucoup de petites interactions	Long parcours sans interaction
Quantité d'énergie perdue	Faible à chaque interaction	Modification majeure (production de particules chargées)
Parcours	Fini	Atténuation exponentielle

Interaction avec la matière

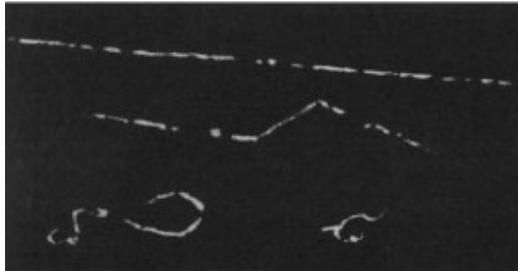
protons



muon



β



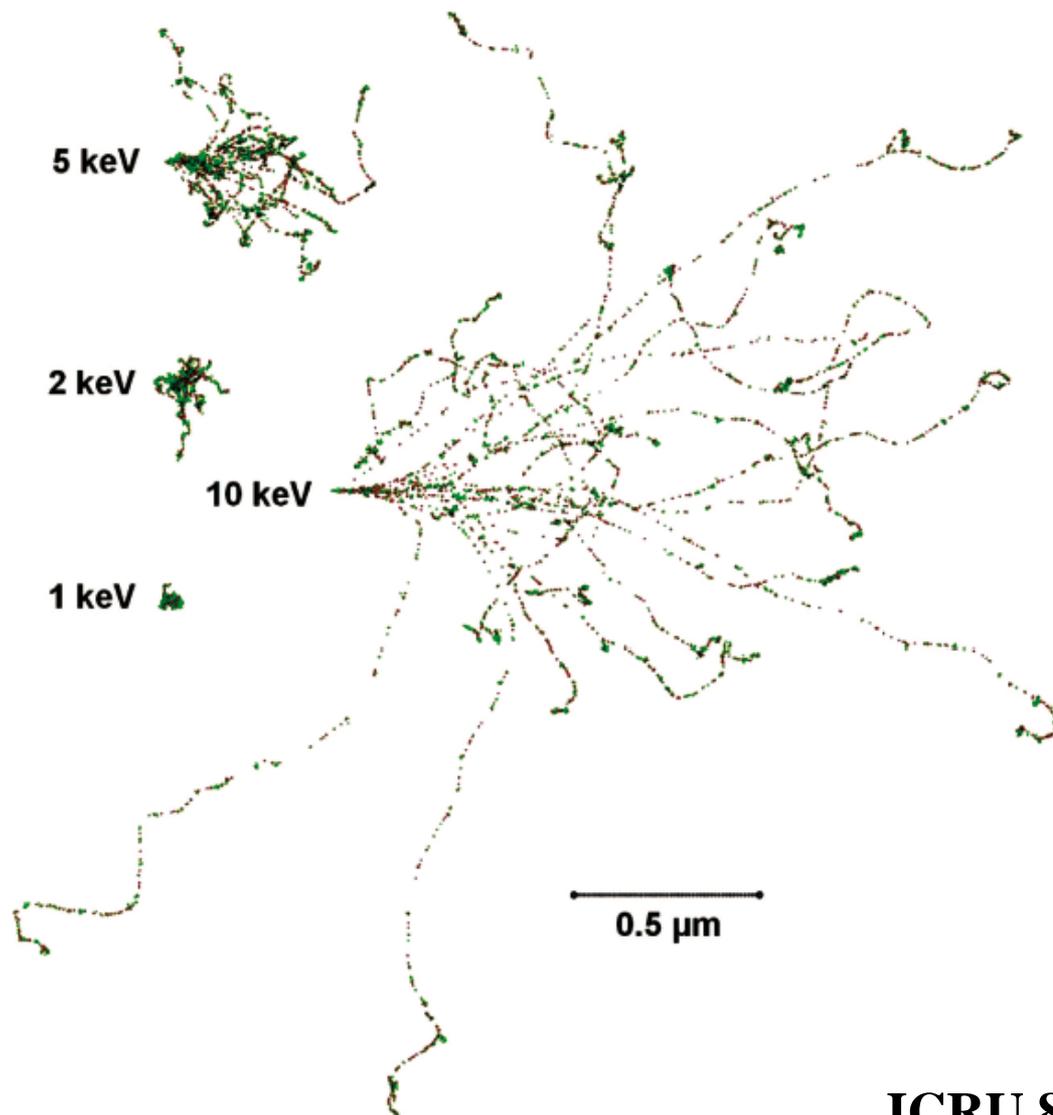
particule α



Electrons

Les interactions électrons-matière consistent essentiellement en collisions entre particules de mêmes masses.

Les électrons interagissant avec la matière ont des trajectoires en **zigzag** et une grande dispersion des traces est possible.



ICRU 86

Figure 2.3. Twenty randomly generated electron tracks for initial kinetic energies of 1 keV, 2 keV, 5 keV, and 10 keV. Red points represent ionizations, and green points represent excitations. All tracks of the same energy start at the same point and initially proceed in the same direction (left to right in the figure).

Electrons

On peut considérer que les particules chargées sont freinées continûment dans la matière en raison des interactions entre leur charge électrique et celles du milieu.

Ces interactions aboutissent à un transfert d'énergie de la particule aux électrons atomiques et (dans une moindre mesure) aux atomes de la matière. Comme on pourrait s'y attendre, plus la matière est dense, plus les électrons sont freinés efficacement.

Un électron peut principalement être freiné de deux manières distinctes :

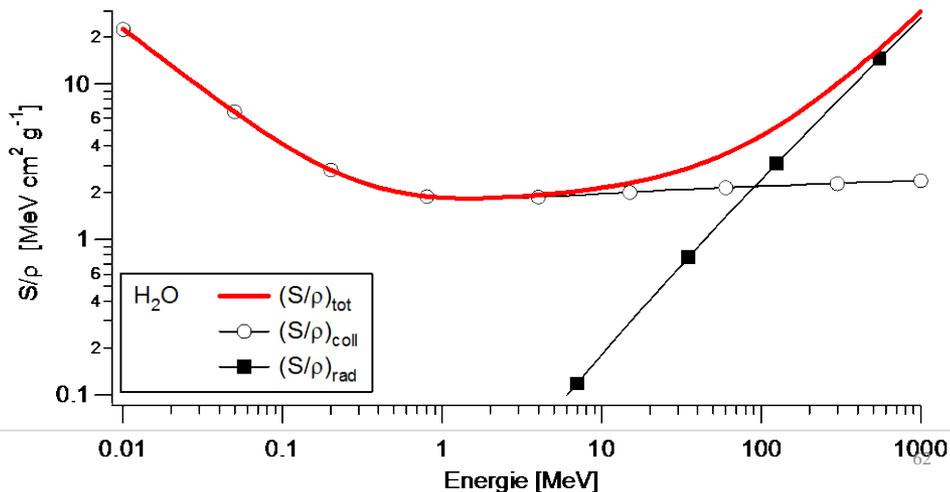
soit par interaction coulombienne avec les électrons de la matière,

soit par interaction radiative avec le champ électromagnétique des noyaux de la matière.

Dans le premier cas (interaction coulombienne), on parle – un peu abusivement – de *collision*.

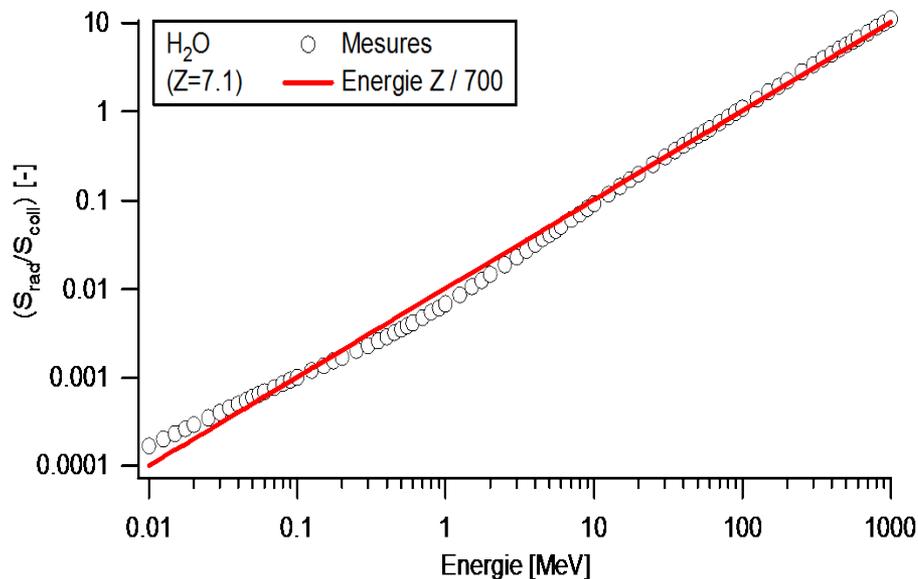
Dans le second cas, on parle de *freinage radiatif* ou de *bremstrahlung*.

Le pouvoir d'arrêt d'un matériau pour une particule est la quantité d'énergie que celle-ci perd par unité de longueur le long de sa trajectoire. Le pouvoir d'arrêt massique est lié à la densité volumique ρ du matériau



Electrons

Plus il y a de protons (i.e. plus le numéro atomique Z est élevé), plus le freinage radiatif est important. L'explication intuitive est simple. Si Z est élevé, cela signifie qu'un électron réussissant à s'approcher du noyau sera en présence d'un champ électromagnétique élevée : la perte d'énergie par freinage radiatif sera donc plus élevée.

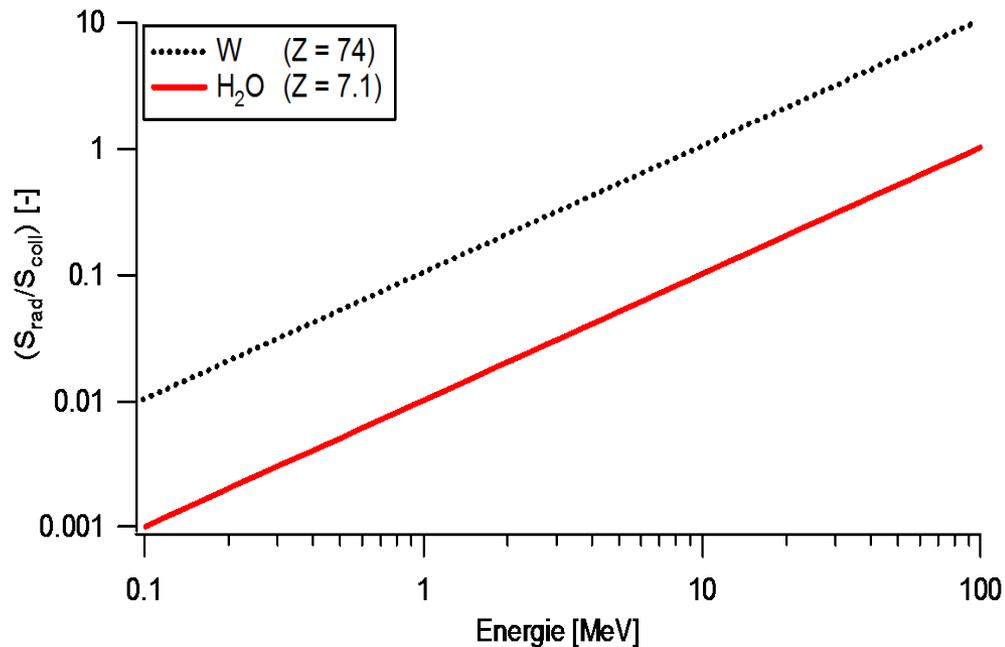


$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{coll}}} \approx \frac{E[\text{MeV}]}{700} Z ,$$

dans l'eau environ 1% de l'énergie est perdue sous forme radiative par un électron de 1 MeV.

~ une énergie de 100 MeV, le freinage radiatif devient dominant sur le freinage par collision.

Electrons



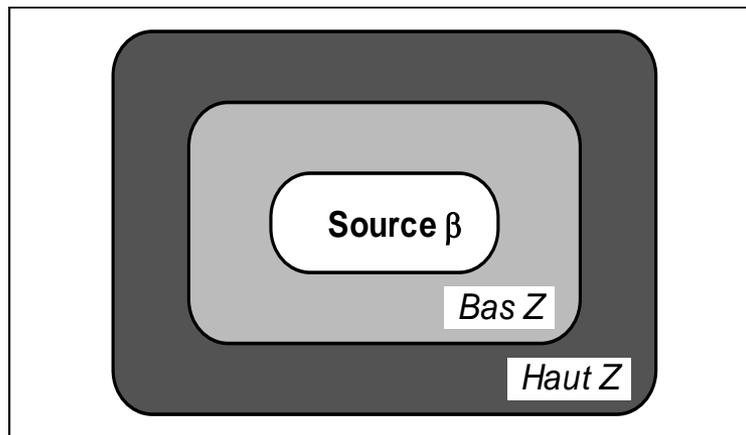
Le freinage radiatif devient dominant par rapport au freinage par collision à partir d'environ 10 MeV.

Ceci explique pourquoi on utilise un matériau de Z élevé pour confectionner l'anode d'un tube à rayons X. En effet, ce qu'on appelle perte par rayonnement de freinage ou bremsstrahlung lorsqu'on s'intéresse au freinage des électrons → Rayons X pour une radiographie.

Electrons



R 11028.pdf
09/192



Pour le rayonnement β de haute énergie, la production de **rayonnement de freinage** – **Bremsstrahlung** – dans les matériaux de **Z élevés** doit être prise en considération.

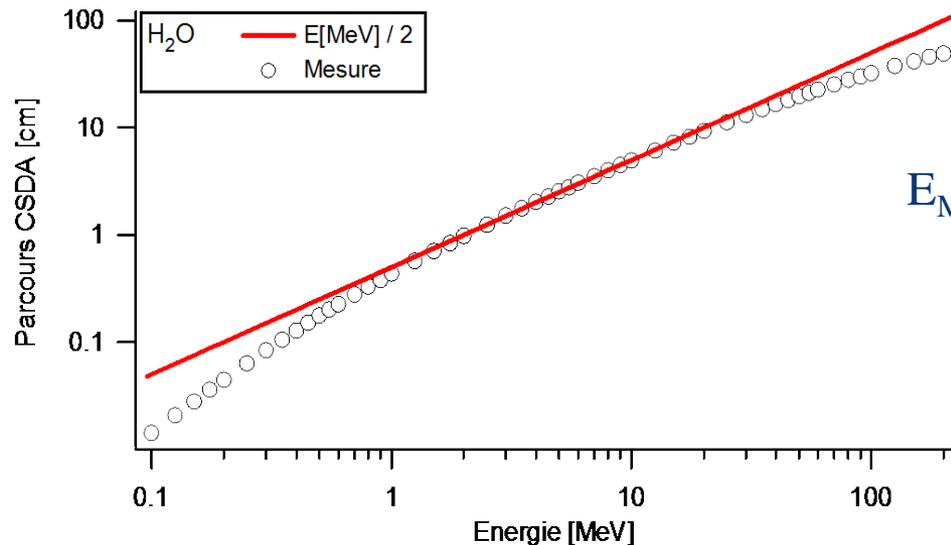
Lorsque la source est intense et de haute énergie, ce rayonnement devient non négligeable, même pour des matériaux de blindage de Z plus faible. Il est nécessaire d'ajouter une protection de plomb destinée à atténuer le rayonnement de freinage autour du plastique destiné à l'arrêt des β .

Electrons

Le parcours des électrons dans la matière dépend directement de l'énergie de la particule (plus l'énergie est élevée, plus le parcours est grand) et de la densité en électrons orbitaux de la matière traversée (plus la densité est élevée, plus le parcours est petit).

Dans le cas de l'eau, il existe une relation empirique entre le parcours (en cm) et l'énergie du faisceau monoénergétique d'électrons (en MeV) :

$$R_e [\text{cm}] \cong \frac{E [\text{MeV}]}{2} .$$

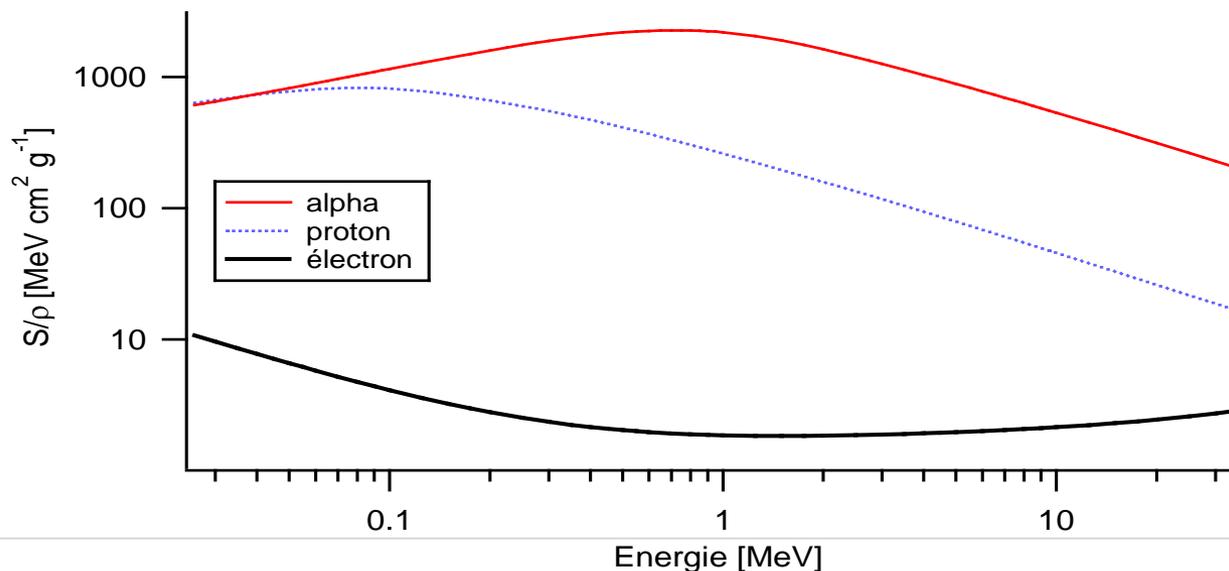


$E_{\text{Max}} (\beta)$ de 2 MeV \rightarrow 1 cm de Plexiglas

Particules lourdes

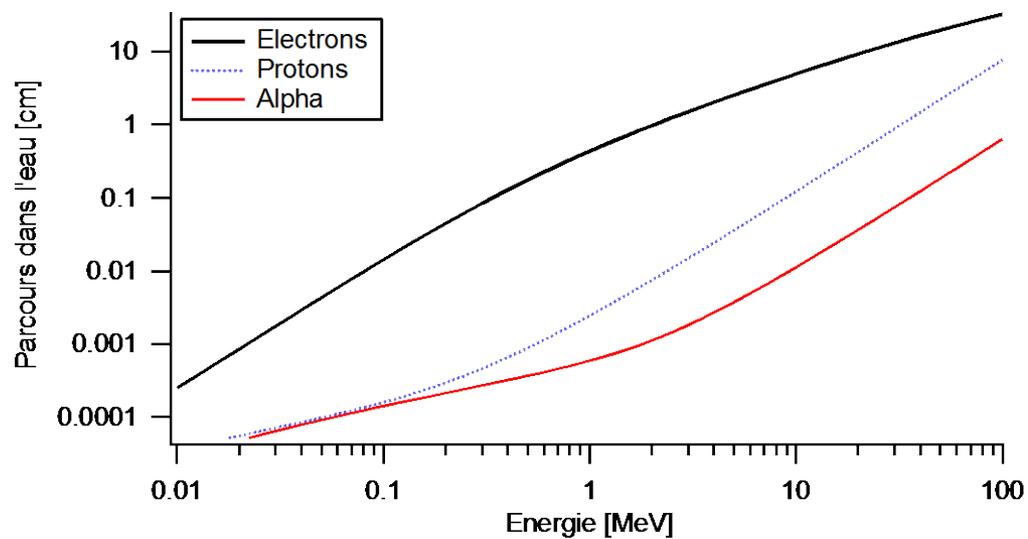
Les particules chargées lourdes (par exemple des protons ou des particules α) interagissent avec la matière essentiellement par la force de coulomb et sont freinées par collisions et pas par perte radiative comme pour les électrons.

Elle progresse donc dans la matière selon une trajectoire rectiligne. Ce n'est que lorsque la particule est proche de l'arrêt que sa trajectoire n'est plus rectiligne

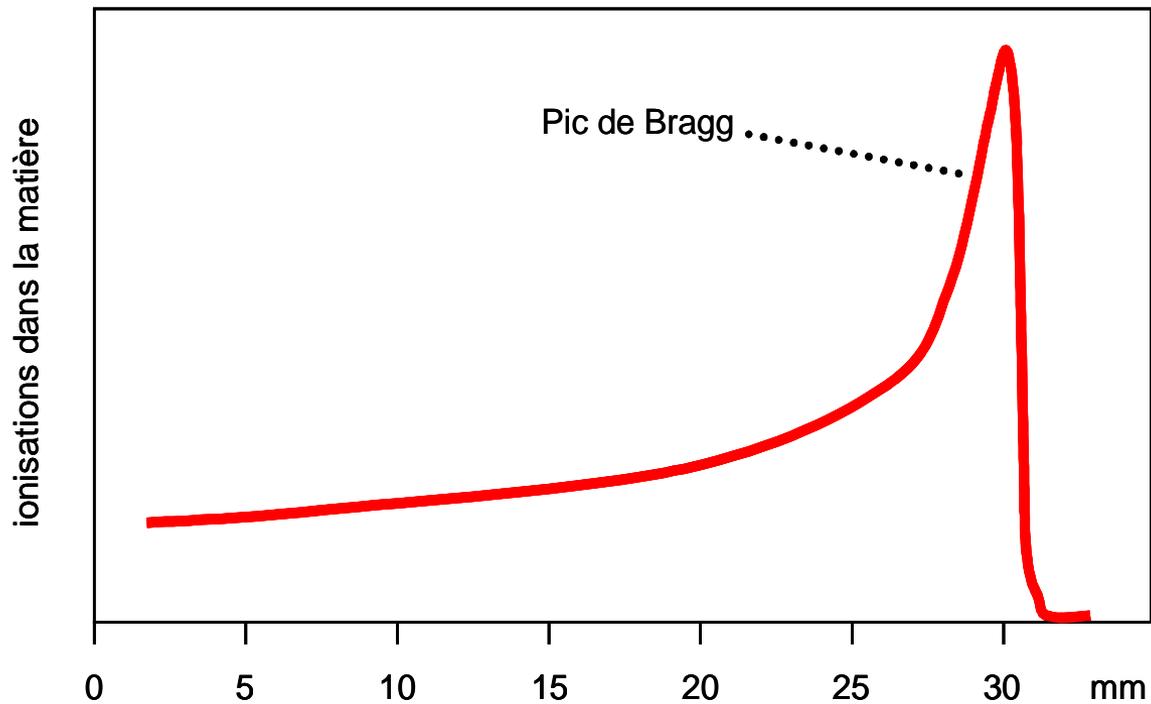


Particules lourdes

Parcours dans l'eau

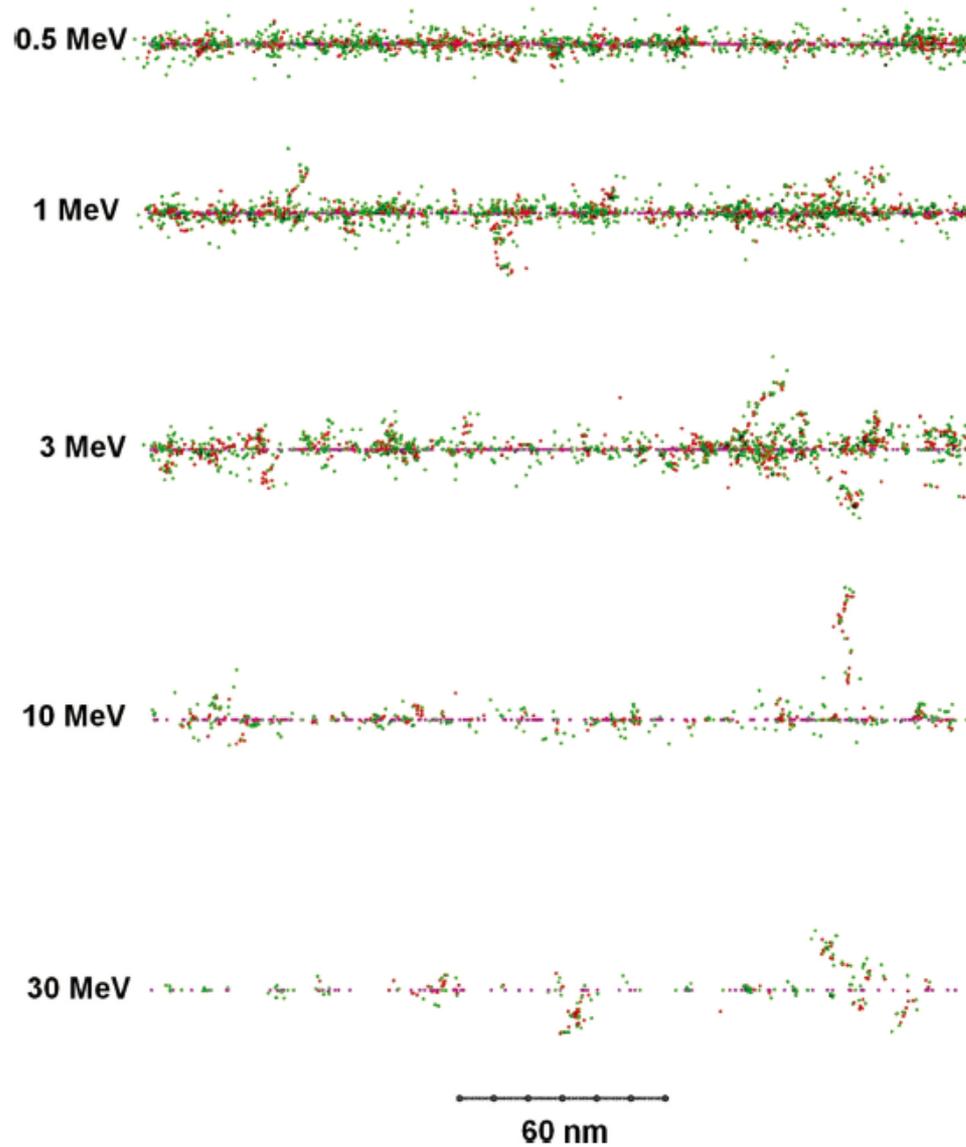


Particules lourdes



exemple d'un faisceau de photons de 62 MeV dans l'eau

Alphas



ICRU 86

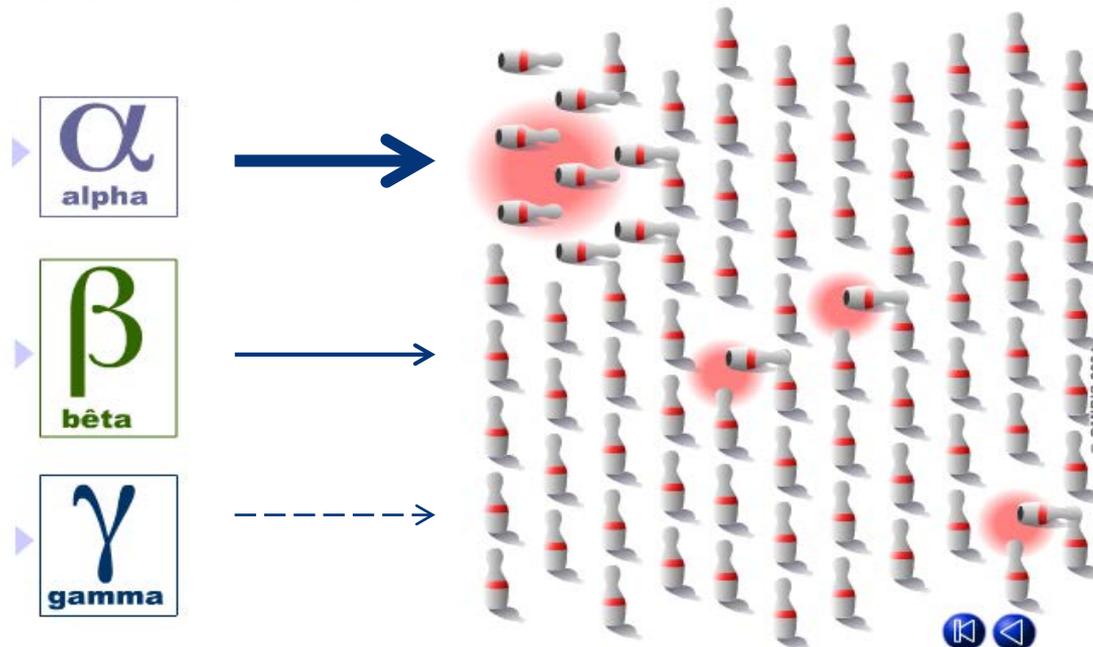
Figure 2.5. Calculated 230 nm track segments for 0.5 MeV, 1 MeV, 3 MeV, 10 MeV, and 30 MeV alpha particles in water. Red points represent ionizations, and green points represent excitations.

Alphas

Le parcours des particules α émises par une source radioactive (énergie typique d'environ 5 MeV) dans du tissu mou est d'environ 0.03 mm.

Cette distance est très faible et correspond à la fine couche de cellule morte en surface de la peau. Il est donc relativement aisé de se protéger d'une telle source externe en utilisant par exemple une simple feuille de papier ou un gant.

Pouvoir de pénétration

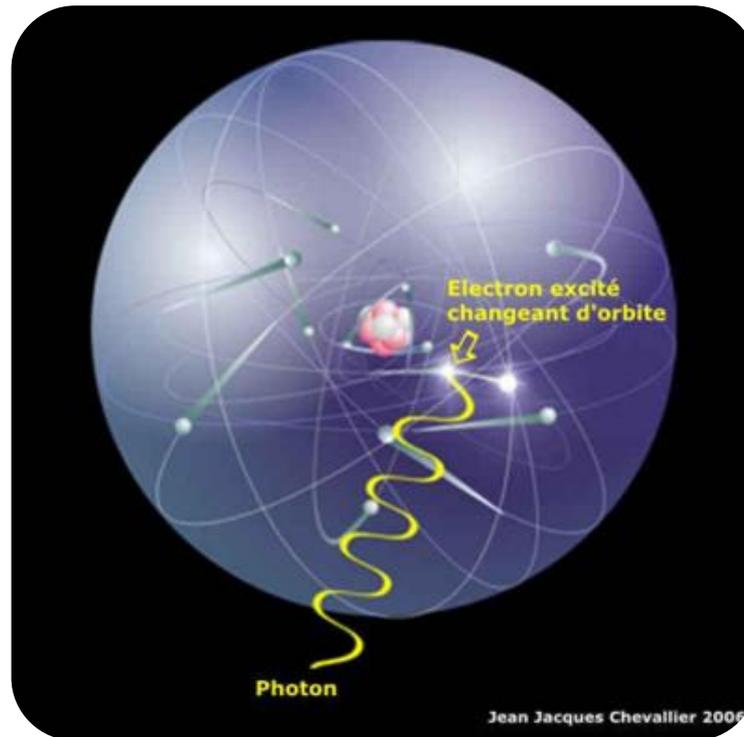


Résumé

- Les particules chargées sont freinées continûment dans la matière. Elles produisent des excitations et des ionisations le long de leur trace.
- Les particules chargées ont une profondeur limite de pénétration dans la matière : le parcours. Plus la particule est lourde et chargée, plus son parcours est petit.
- Dans le cas des électrons :
 - La trajectoire est chaotique (zigzags).
 - La force de freinage par collision augmente à faible énergie
- Le positron (ou particule bêta plus) a le même comportement que l'électron. La différence réside en fin de trajectoire, lorsqu'il s'annihile avec un électron du milieu pour créer deux photons de 511 keV.
- Dans le cas des particules chargées lourdes (masse supérieure ou égale à celle du proton) :
 - La trajectoire est rectiligne.
 - Le freinage est dû essentiellement aux collisions avec les électrons du milieu.
 - La force de freinage augmente à faible énergie (pic de Bragg).
- Les différences principales entre les photons et les particules chargées du point de vue de l'interaction sont :
 - Les photons sont indirectement ionisants alors que les particules chargées sont directement ionisantes.
 - Les photons réalisent un petit nombre d'interactions libérant une grande quantité d'énergie alors que les particules réalisent un grand nombre d'interactions en libérant peu d'énergie à chaque fois.

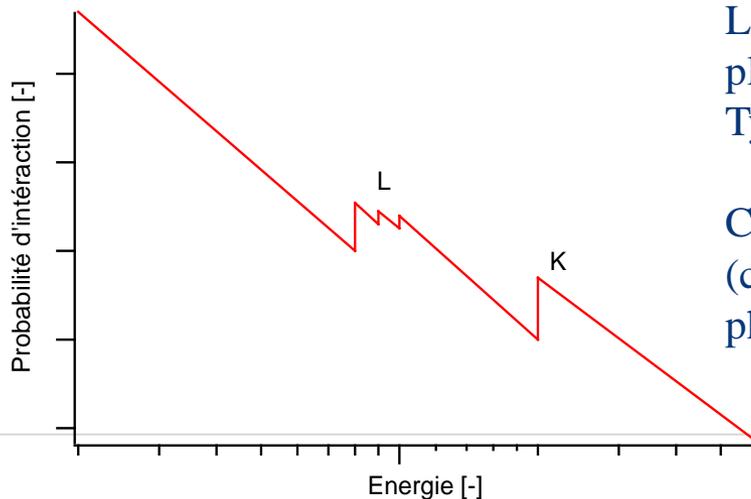
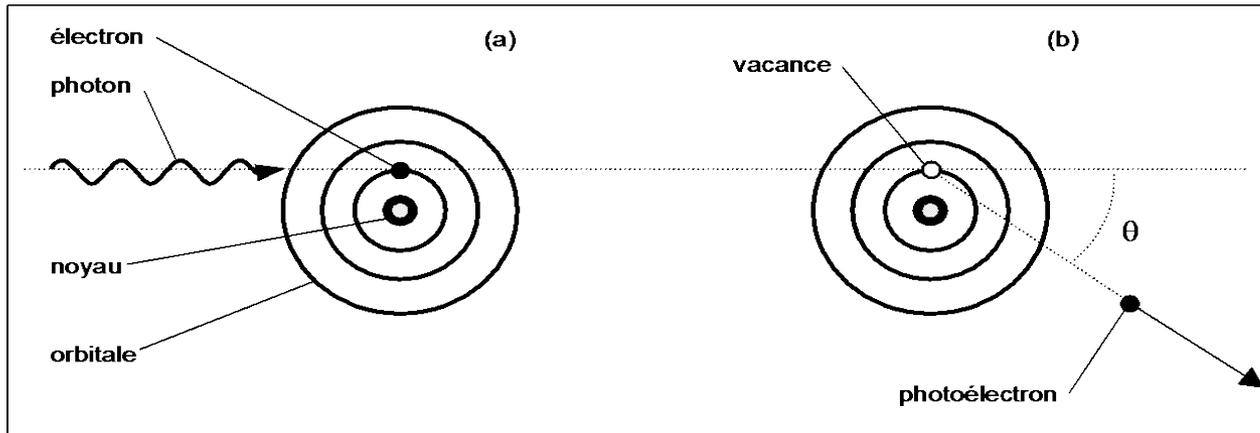
Photons

Un photon pénétrant dans la matière peut interagir avec les électrons atomiques, le noyau ou les champs électromagnétiques présents autour des électrons ou du noyau. Lors d'une interaction, le photon peut "rebondir" sans perte d'énergie (diffusion élastique), "rebondir" avec perte d'énergie (diffusion inélastique), ou "disparaître" avec perte de toute son énergie (absorption).



Photons

L'effet photoélectrique consiste en l'absorption d'un photon par un électron d'un atome. Le photon disparaît dans l'interaction et cède toute son énergie à l'électron. L'atome résultant de cette interaction est alors ionisé

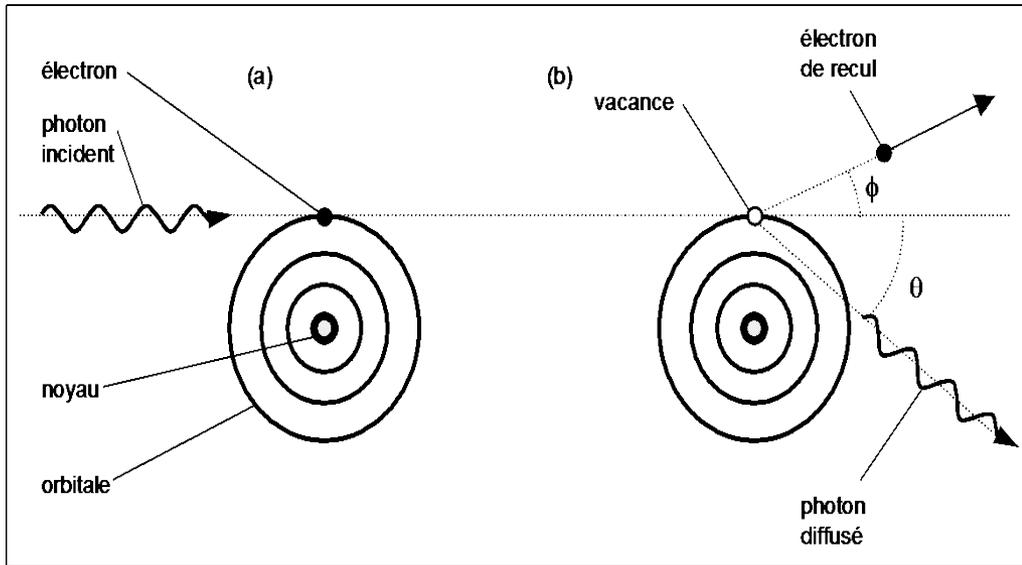


La probabilité de l'effet photoélectrique est d'autant plus grande que le numéro atomique (Z) est élevé. Typiquement, cette probabilité varie selon $Z^{4,5}$.

Ceci explique pourquoi les matériaux de haut Z (comme le plomb) sont utilisés pour absorber les photons (en particulier ceux de basse énergie).

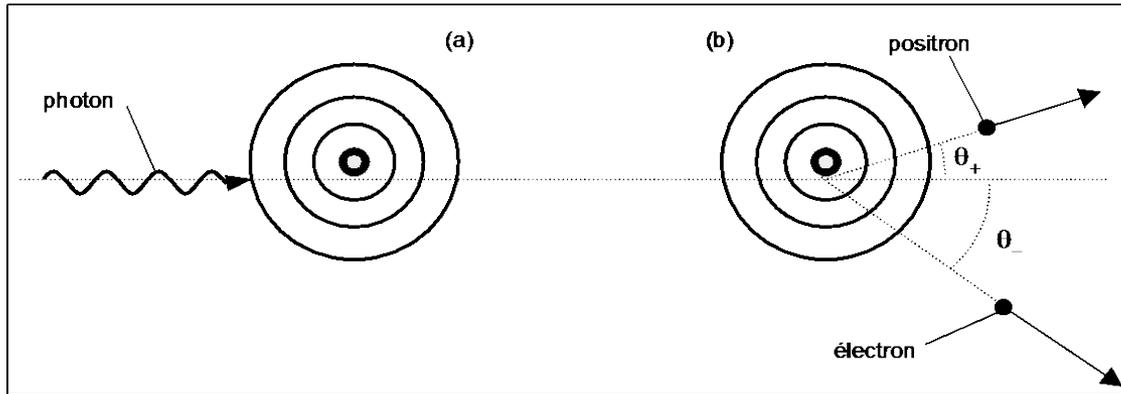
Photons

L'effet Compton (également appelé *diffusion inélastique*): un photon entre en collision avec un électron. Une partie de l'énergie du photon est transmise à l'électron, qui recule. Le reste de l'énergie apparaît sous la forme d'un photon diffusé.



Photons

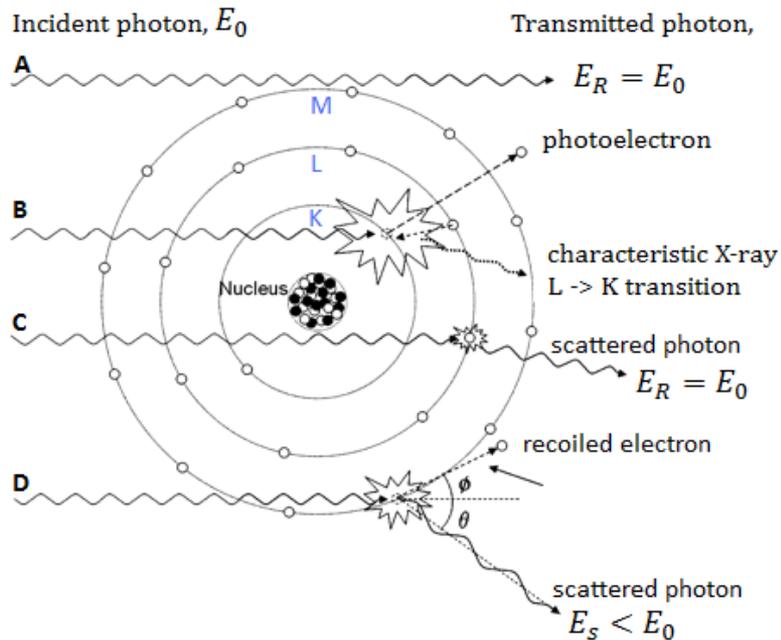
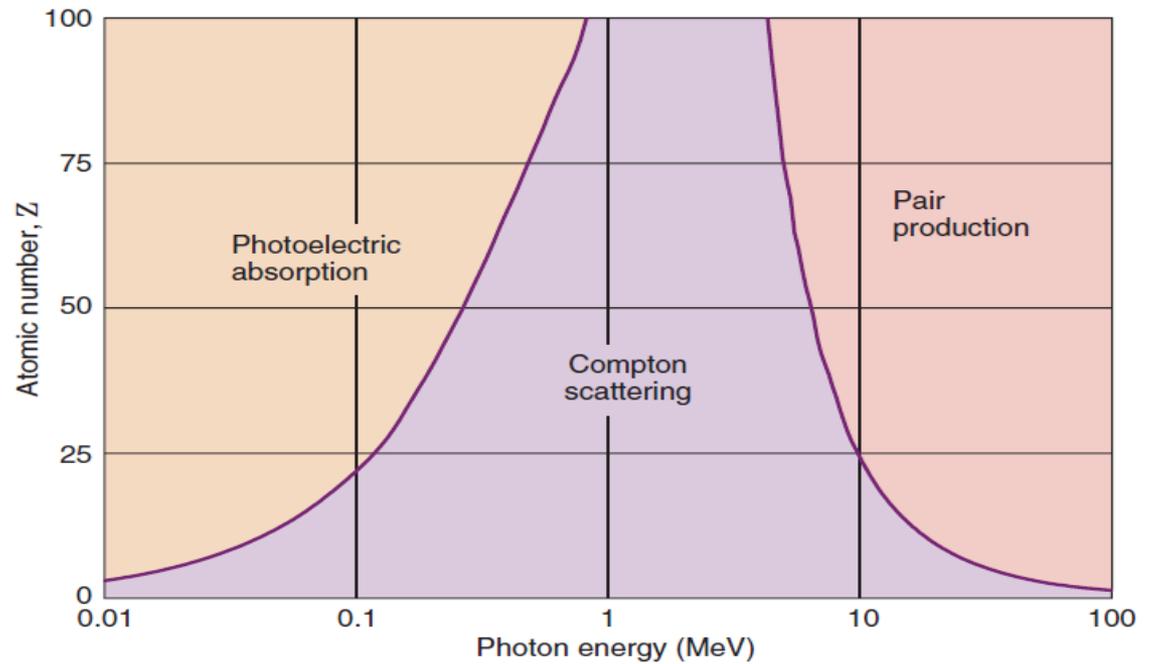
La *création de paire* est une absorption du photon par le champ électromagnétique du noyau. Elle consiste en la matérialisation du photon en une paire électron-positron



L'énergie minimale nécessaire au photon incident pour qu'une création de paire soit possible est de 1022 keV (deux fois 511 keV).

Une fois l'énergie de seuil dépassée, la probabilité d'interaction augmente avec l'énergie

Photons



A. TRANSMITTED UNAFFECTED
No interaction

B. PHOTOELECTRIC ABSORPTION
Collision with a tightly bound inner-shell electron

C. RAYLEIGH SCATTERING
Elastic collision with a bound outer-shell electron

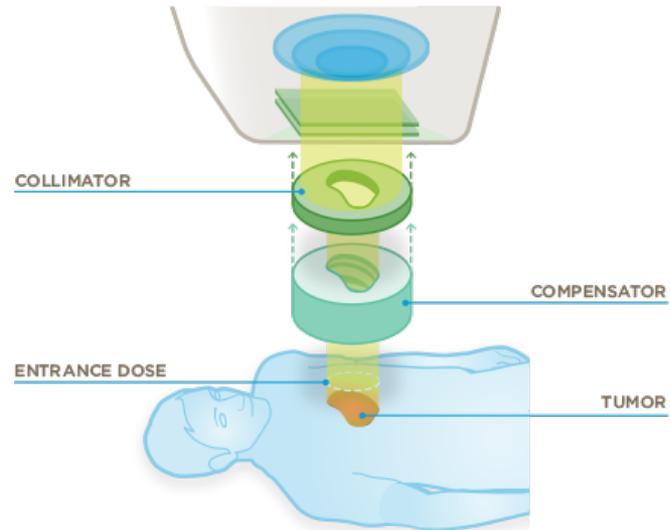
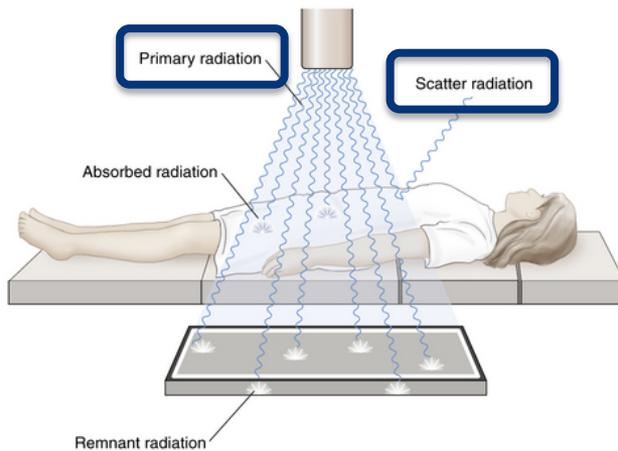
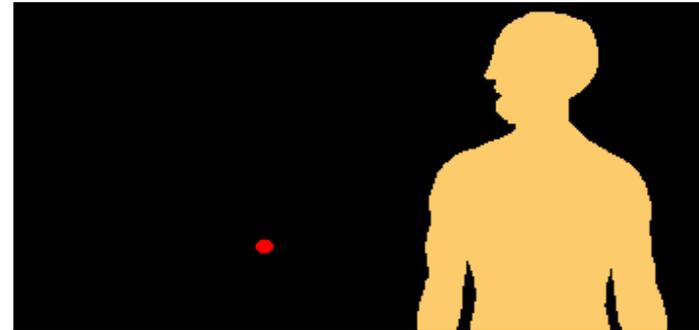
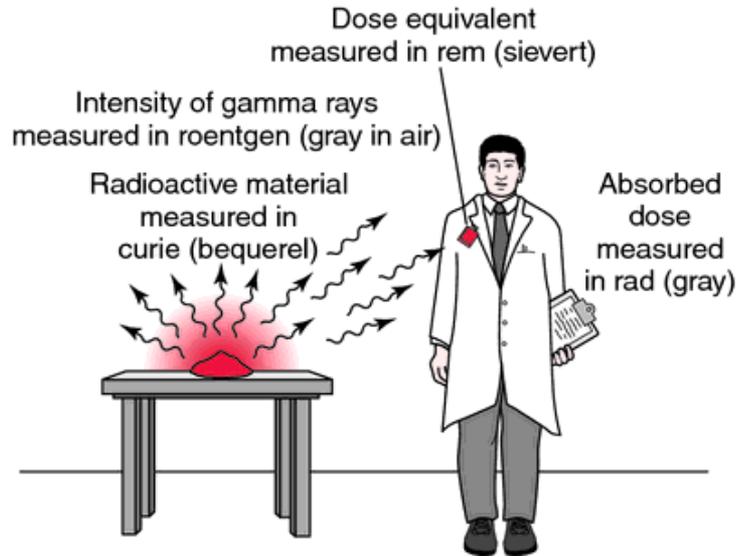
D. COMPTON SCATTERING
Inelastic collision with weakly bound outer-shell electron

Résumé

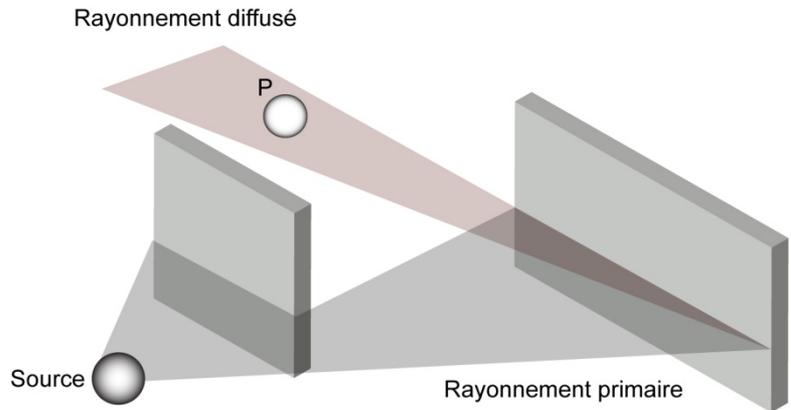
- L'effet photoélectrique est l'absorption d'un photon par un électron atomique. Sa probabilité est maximale lorsque l'énergie du photon est juste suffisante pour éjecter l'électron hors de la couche dans laquelle il se trouve. Le coefficient d'interaction décroît avec l'énergie $(1/h\nu)^3$ et augmente rapidement avec le Z du milieu ($Z^{4.5}$).
- L'effet Compton est la diffusion inélastique d'un photon sur un électron dans laquelle l'électron absorbe une partie de l'énergie du photon. La probabilité de l'effet Compton décroît avec l'énergie du photon. Elle ne dépend pas directement du numéro atomique du milieu mais est proportionnelle à la densité électronique.
- La création de paires consiste en la matérialisation d'une paire électron-positron lorsqu'un photon disparaît au voisinage d'un noyau. L'interaction a un seuil de 1022 keV. La probabilité de la création de paires croît avec l'énergie du photon incident ainsi qu'avec le numéro atomique de la matière.
- Le positron obtenu par création de paires finit par être ralenti et se désintègre avec un électron du milieu en produisant deux photons de 511 keV.
- L'effet photoélectrique est prédominant à basse énergie, l'effet Compton domine à énergie moyenne (typiquement de 100 keV à 10 MeV) et la création de paires devient dominante à haute énergie.



Rayonnement primaire



Rayonnement diffusé



Exemple de situation où le rayonnement diffusé joue un rôle non négligeable dans les techniques de protection.



Le rayonnement diffusé produit lors de l'interaction avec la matière n'a pas la même direction que le rayonnement primaire.

Au point P, la contribution du rayonnement direct est fortement réduite par la présence du mur. La contribution du rayonnement diffusé peut cependant y être importante.

La fraction du rayonnement diffusée de cette manière représente quelques ‰ du rayonnement primaire. Il peut jouer un rôle non négligeable dans les techniques de protection vis-à-vis des champs de radiation intenses.