



UE 3A

Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

Dr Tristan Richard

UE 3A : Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

- MODULE 1: Etats de la matière et leur caractérisation
- MODULE 2: Méthodes d'étude en électrophysiologie jusqu'à l'ECG
- MODULE 3: Les très basses fréquences du spectre électromagnétique
- MODULE 4: Le domaine de l'optique (prépare en particulier la microscopie en UE2)
- **MODULE 5: Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers**
- MODULE 6: Utilisations thérapeutiques

Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers

Natures et propriétés des REM

Principales caractéristiques des rayonnements α et β

Interaction avec la matière: effet photo-électrique, diffusions, matérialisation

Détection

- **Physique Nucléaires : Généralités**
- **La radioactivité**



Physique Nucléaire: Généralités

Physique Nucléaire: Généralités

1. Le noyau atomique

1.1 Structure du noyau

1.2 Caractéristiques du noyau

2. Les modèles atomiques

2.1 Modèle de Bohr

2.2 Modèle de Schrödinger

3. Les modèles nucléaires

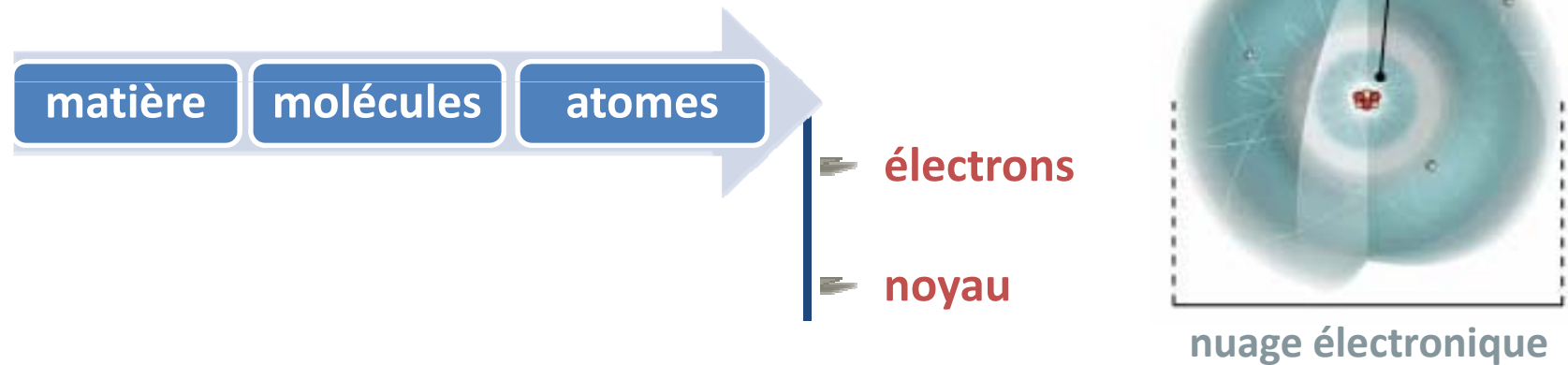
3.1 Forces de cohésion nucléaires

3.2 Modèles nucléaires

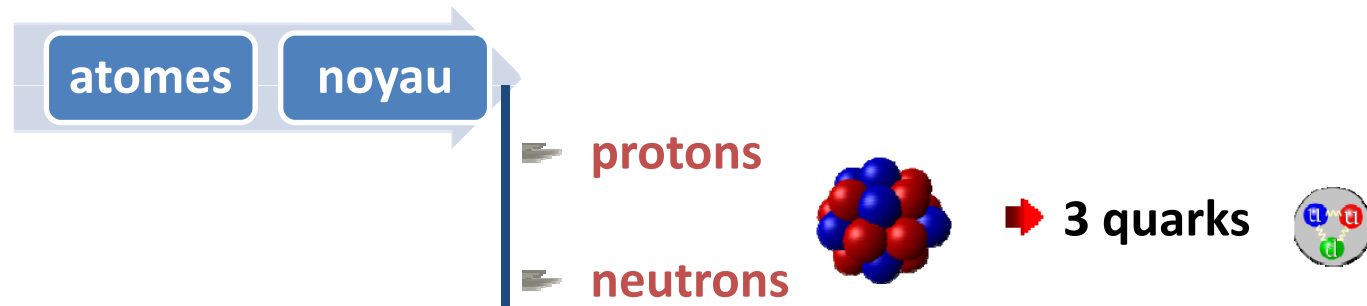
4. Stabilité et instabilité du noyau

1. Le noyau atomique

1.1 Structure du noyau



physique nucléaire: phénomènes physiques faisant intervenir le noyau atomique



quarks: particules fondamentales (sans structure interne connue) constituant les nucléons

1.2 Caractéristiques du noyau

1.2.1 Définitions

● noyau caractérisé par 2 nombres:

● **A**: nombre de nucléons ou nombre de masse

● **Z**: nombre de charges ou numéro atomique

● convention notation nucléide **X**:
$$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$$

● atome = noyau + électrons: charge nulle (particule neutre)

● **Z** protons (p) = nombre d'électrons (e^-)

● **N** neutrons (n) $N = A - Z$

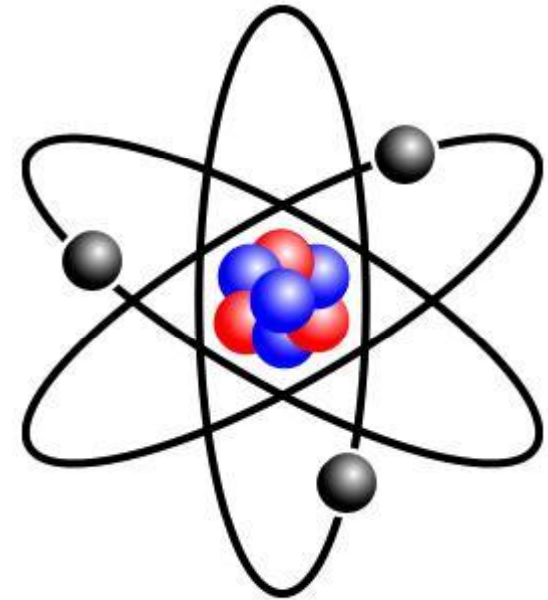


TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

GROUPE		TABLEAU PERIODIQUE DES ELEMENTS																18 VIIIA					
1 IA												13 IIIA		14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA		18 VIIIA	
PÉRIODE	1	2											13	14	15	16	17	18					
	1.0079																						
1	H																			He			
	HYDROGÈNE																			HÉLIUM			
2	Li	Be																					
	LITHIUM	BÉRYLLIUM																					
3	Na	Mg																					
	SODIUM	MAGNÉSIIUM																					
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
	POTASSIUM	CALCIUM	SCANDIUM	TITANE	VANADIUM	CHROME	MANGANÈSE	FER	COBALT	NICKEL	CUIVRE	ZINC	GALLIUM	GERMANIUM	ARSENIC	SÉLÉNIUM	BROME	KRYPTON					
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
	RUBIDIUM	STRONTIUM	YTTRIUM	ZIRCONIUM	NIوبيUM	MOLYBDÈNE	TECHNÉTIUM	RUTHÉNIUM	RHODIUM	PALLADIUM	ARGENT	CADMIUM	INDIUM	ETAIN	ANTIMOINE	TELLURE	IODE	XÉNON					
6	Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
	CÉSIIUM	BARYUM	Lanthanides	HAFNIUM	TANTALE	TUNGSTÈNE	RHÉNIUM	OSMIUM	IRIDIUM	PLATINE	OR	MERCURE	THALLIUM	PLOMB	BISMUTH	POLONIUM	ASTATE	RADON					
7	Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub		Uuq									
	FRANCIUM	RADIUM	Actinides	RUTHERFORDIUM	DUBNIUM	SEABORGIUM	BOHRIUM	HASSIUM	MEITNERIUM	UNUNNIUM	UNUNUNIUM	UNUNBIUM		UNUNQUADIUM									

Lanthanides

57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CÉRIUM	59 140.91 Pr PRASÉODYME	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.04 Yb YTTERBIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM
------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

Actinides

89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELÉVIUM	102 (259) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.

Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

● **isobares**: même **A**, **Z** différents

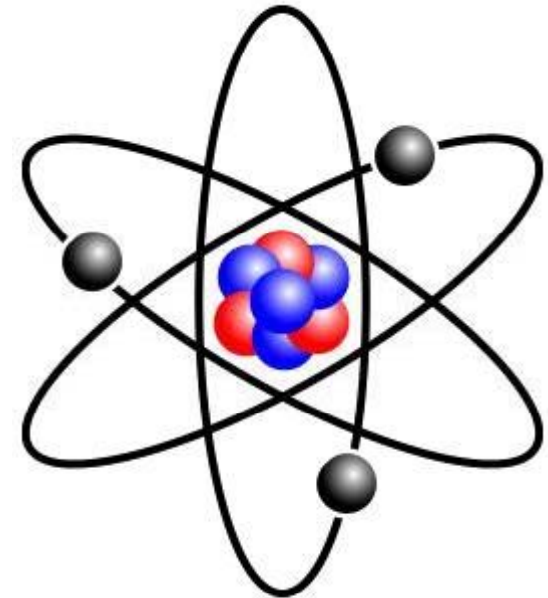
● exemple: $^{32}_{15}\text{P}$ $^{32}_{16}\text{S}$

● **isotones**: même **N**, **A** et **Z** différents

● exemple: $^{39}_{19}\text{K}$ $^{40}_{20}\text{Ca}$

● **isotopes**: même **Z**, **A** différents

● exemple: ^1_1H ^2_1H ^3_1H
Hydrogène Deutérium Tritium
Formes isotopiques d'un même élément



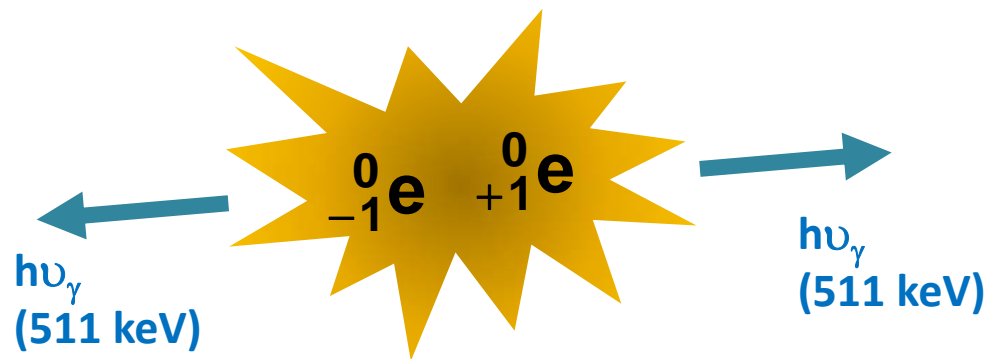
• **particules fondamentales**: particules sans structure interne (actuellement)

• **avant années 1960**: travaux avec accélérateurs de particules (CERN)

- proton et neutron ne sont pas des particules fondamentales
- existence des antiparticules
- augmentation du nombre de particules connues

positon (e^+): antiélectron (même masse e^- charge opposée)

annihilation: $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$



● **après années 1960**: développements liés à théorie du Big-Bang

- introduction des **quarks**: particules fondamentales constituant les nucléons
- autres particules fondamentales

	Nom	Symbole	Charge électrique	Masse (GeV/c ²)
Première famille	up	u	2e/3	0,39
	down	d	-e/3	0,39
Seconde famille	charm	c	2e/3	1,55
	strange	s	-e/3	0,51
Troisième famille	top	t	2e/3	>80
	beauty	b	-e/3	4,7

● **proton**: 3 quarks (u, u, d)

● **neutron**: 3 quarks (u, d, d)

● **cohésion des quarks**: interaction nucléaire forte

Peuvent être au même endroit dans un même état quantique

Spin entier, suivent la statistique de Bose-Einstein

Bosons

Matière ← Fermions

Spin demi-entier, suivent la statistique de Fermi-Dirac

Noms				Composition	Symboles
Bosons	Graviton			Particules fondamentales	G
	Photon				γ
	Gluons				g
	Mésons			Nombre pair de quarks et d'antiquarks	$\Pi, K, \eta, \rho, \phi, D, \dots$
	Bosons intermédiaires			Particules fondamentales	W^+, W^-, Z^0
Fermions	Baryons	Nucléons	Proton	3 quarks	p
			Neutron	3 quarks	n
		Autres baryons		3 quarks (et plus)	$\Delta, \Xi, \Lambda, \Sigma, \Omega, \dots$
	Leptons	Électron		Particules fondamentales	e^-
		Neutrino associé à l'électron			ν_e
		Muon			μ
		Neutrino associé au muon			ν_μ
		Tau			τ
		Neutrino associé au tau			ν_τ
	Quarks				u, d, c, s, t, b

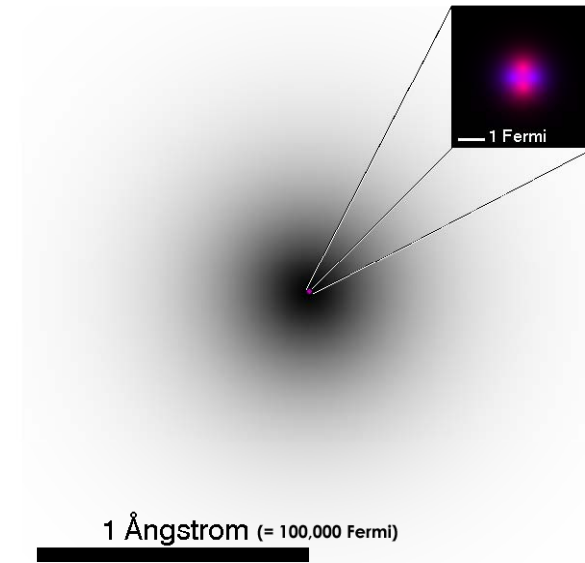
Ne peuvent pas être au même endroit dans un même état quantique (principe d'exclusion de Pauli)

1.2.3 Dimensions

• atome : 1.10^{-10} m = 1 Angström (Å)

• noyau : 1.10^{-15} m = 1 femtomètre (fm)

noyau **100000** fois plus petit que atome



1.2.4 Masses et charges

	charge	masse
électron	$-1,602.10^{-19}$ C	$0,9109.10^{-30}$ Kg
proton	$1,602.10^{-19}$ C	$1,6726.10^{-27}$ Kg
neutron	nulle	$1,6749.10^{-27}$ Kg

masse atome concentrée noyau

1.2.5 Unités

1.2.5.1 Masse

● unité de masse SI (Kg) **inadaptée**

physique nucléaire : **unité de masse atomique (u)**
1/12 de la masse d'un atome de l'isotope 12 du carbone

● masse 1 mole de $^{12}\text{C} = 12 \text{ g}$

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \frac{12 \cdot 10^{-3}}{N_a} \approx 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

$$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

	Masse (en u)
électron	0,00548
proton	1,00727
neutron	1,00866

1.2.5.2 Energie

• unité de l'énergie SI (joule) **inadaptée**

physique nucléaire : **électron-volt (eV)**

énergie cinétique d'un électron sous une différence de potentiel de 1 volt

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

• unités dérivées:

unités	
KeV	$1 \cdot 10^3 \text{ eV}$
MeV	$1 \cdot 10^6 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
GeV	$1 \cdot 10^9 \text{ eV}$

1.2.6 Energie de liaison des nucléons

1.2.6.1 Défaut de masse

- masse atomique $\neq \Sigma$ masse constituants (n, p, e⁻)
- masse atomique réelle < masse calculée ($Zm_p + Nm_n + Zm_e$)
- différence = défaut de masse (Δm)

élément	masse atomique (en u)	$Zm_p + Nm_n + Zm_e$ (u)	Δm (u)
Deutérium	2,0141	2,0165	0,0024
Carbone 12	12,0000	12,0989	0,0989
Fer 56	55,9349	56,4633	0,5284
Uranium 238	238,0508	239,9845	1,9337

- masse atome A_ZX : $m_X = Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n - \Delta m$

1.2.6.2 Equivalence masse-énergie

équivalence masse-énergie:

une particule de masse m possède une énergie de masse

$$E = m c^2$$

relation
d'Einstein

● équivalence l'unité de masse atomique

$$(1 \text{ u}) c^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

	énergie de masse (en $\text{MeV} \cdot c^{-2}$)
électron	0,511
proton	938,27
neutron	939,57

1.2.6.3 Energie de liaison

énergie de liaison:

énergie associée défaut de masse

$$B = \Delta m c^2$$

● énergie liaison atome ${}^A_Z X$: $B = (Zm_p + Zm_e + (A - Z)m_n - m_x)c^2$

● énergie liaison par nucléon: B/A

● énergie liaison: **cohésion du noyau**

● énergie à fournir pour dissocier les constituants du noyau

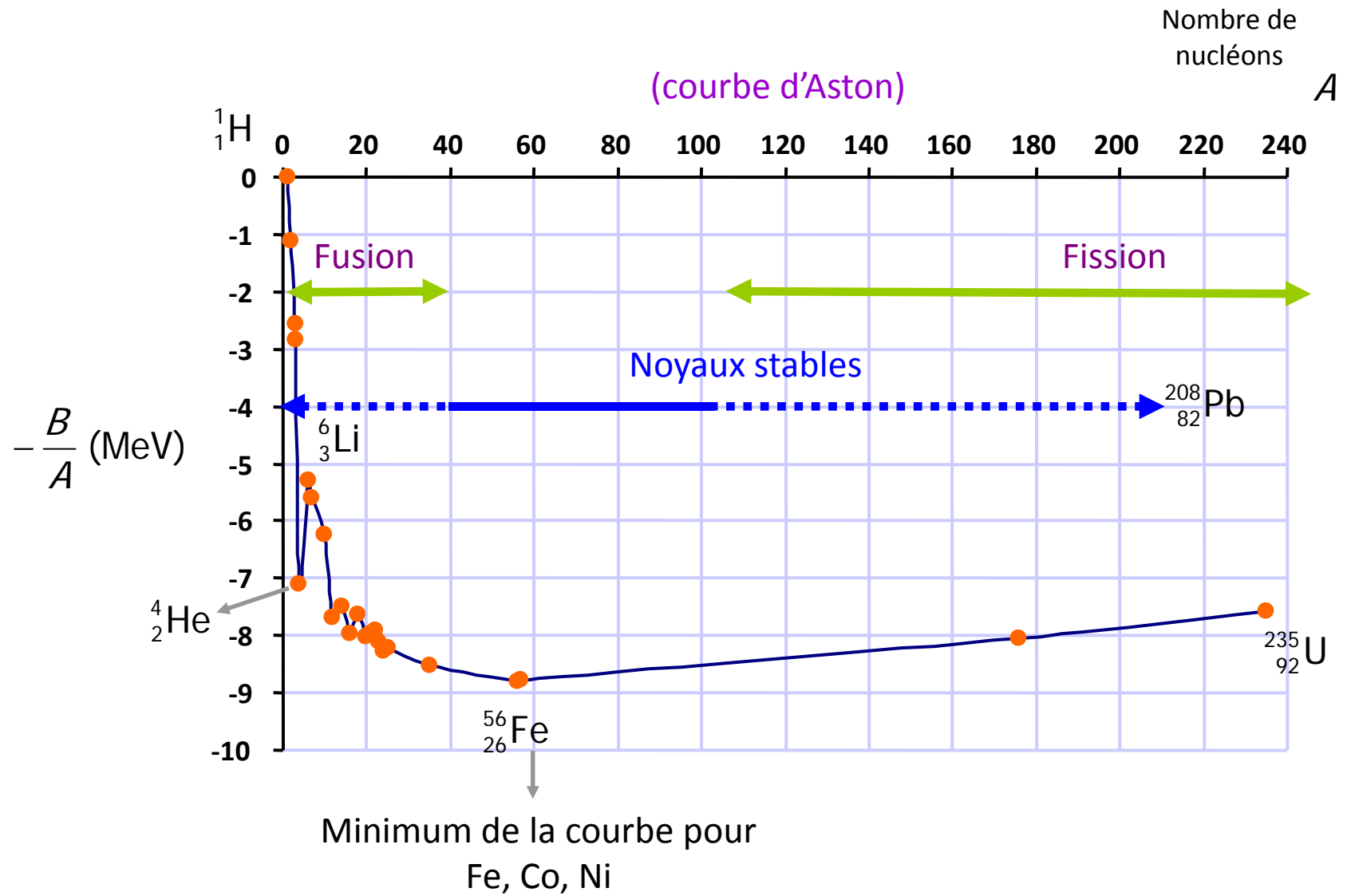
● exemple ${}^{12}\text{C}$ et ${}^{56}\text{Fe}$:

● $B_{12\text{C}}/A = 0,0989 \times 931,5/12 = 7,7 \text{ MeV}$

● $B_{56\text{Fe}}/A = 0,5284 \times 931,5/56 = 8,8 \text{ MeV}$

● $B_{56\text{Fe}}/A > B_{12\text{C}}/A \rightarrow {}^{56}\text{Fe} \text{ plus stable que } {}^{12}\text{C}$

● énergie liaison par nucléon en fonction de A



● **atomes stables** → **masse atomique # 60**

● Fer (Fe), Cobalt (Co), Nickel (Ni)

● **éléments légers** ($Z < 60$) → **stabilité par fusion**

● libération d'énergie

● formation de noyaux plus lourds

● **éléments lourds** ($Z > 60$) → **stabilité par fission**

● libération d'énergie

● formation de noyaux plus légers

2. Les modèles atomiques

2.1 Modèle de Bohr

2.1.1 Description du modèle

- **modèle de Bohr (Niels Bohr - 1913)**

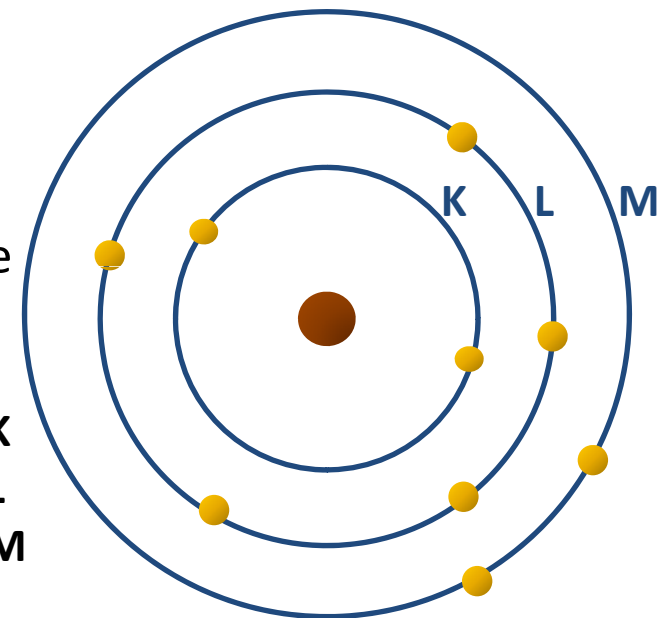
- noyau compact (10^{-15} m) **chargé \oplus**

- électrons ponctuels **chargés \ominus**

- orbites électrons **stables et parfaitement définies** (quantification)

- **transfert d'énergie** → changement d'orbite

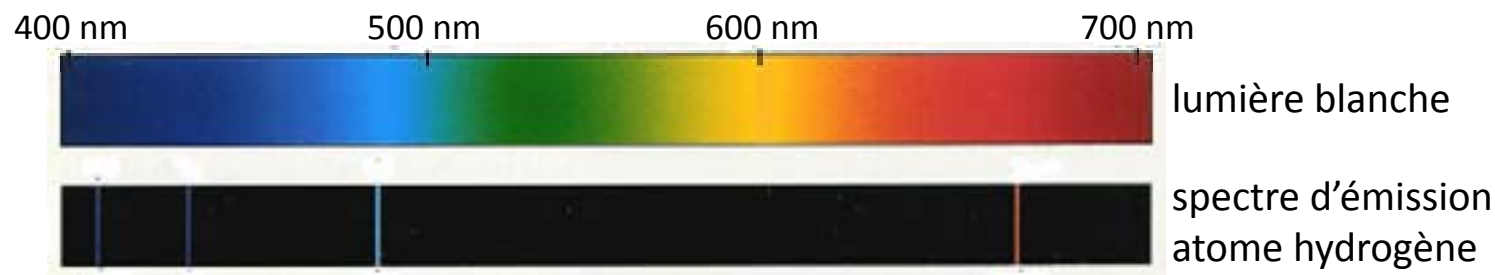
$n = 1 \rightarrow$ orbite K
 $n = 2 \rightarrow$ orbite L
 $n = 3 \rightarrow$ orbite M
(...)



modèle de l'atome de Bohr

- modèle de Bohr: description **phénomènes spectroscopiques fondamentaux**
 - énergie absorbée ou émise quantifiée
 - **ensemble discret d'états d'énergie**
 - transition entre état d'énergie: **émission ou absorption discrète d'énergie**
 - raies spectroscopiques des atomes

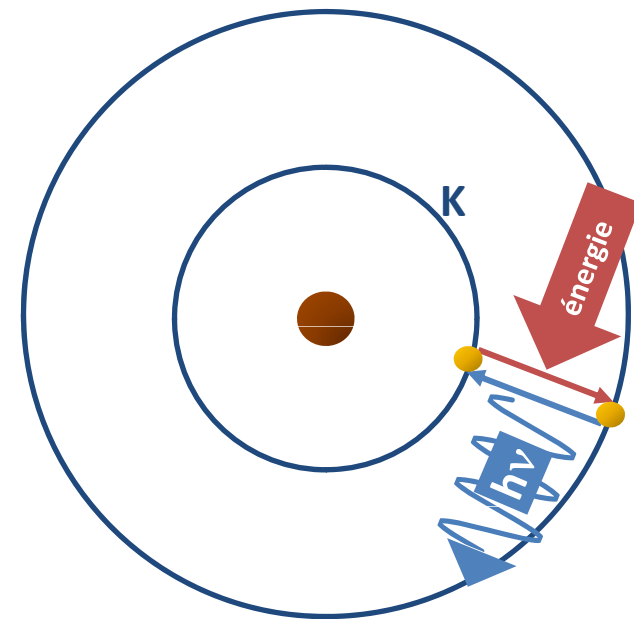
2.1.2 Atome d'Hydrogène



- atome Hydrogène: **1 p** et **1 e⁻**
 - état fondamental = **état stable** → **orbitale K**
 - énergie de liaison **E₁ = - 13,6 eV**

- **apport énergie**: transition e⁻ orbitale K vers orbitale supérieure (L, M, ...)

- état excité = **état instable**
 - retour état fondamental
 - émission énergie → **photon hv**



modèle de l'atome d'hydrogène

● énergie $h\nu$ quantifiée:

● n_f nombre quantique niveau arrivée

● n_i nombre quantique niveau départ

$$h\nu_{if} = E_1 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

● longueur d'onde:

$$\lambda_{if} = \frac{c}{\nu_{if}} = \frac{hc}{E_1 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)}$$

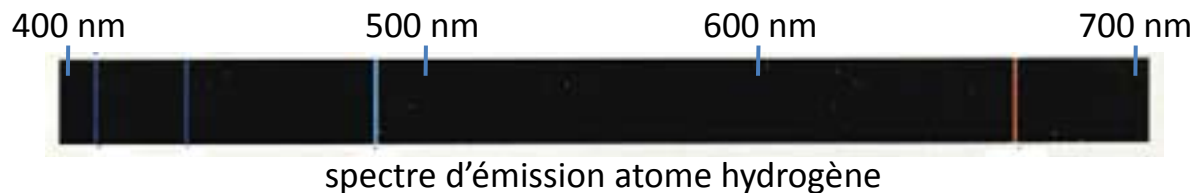
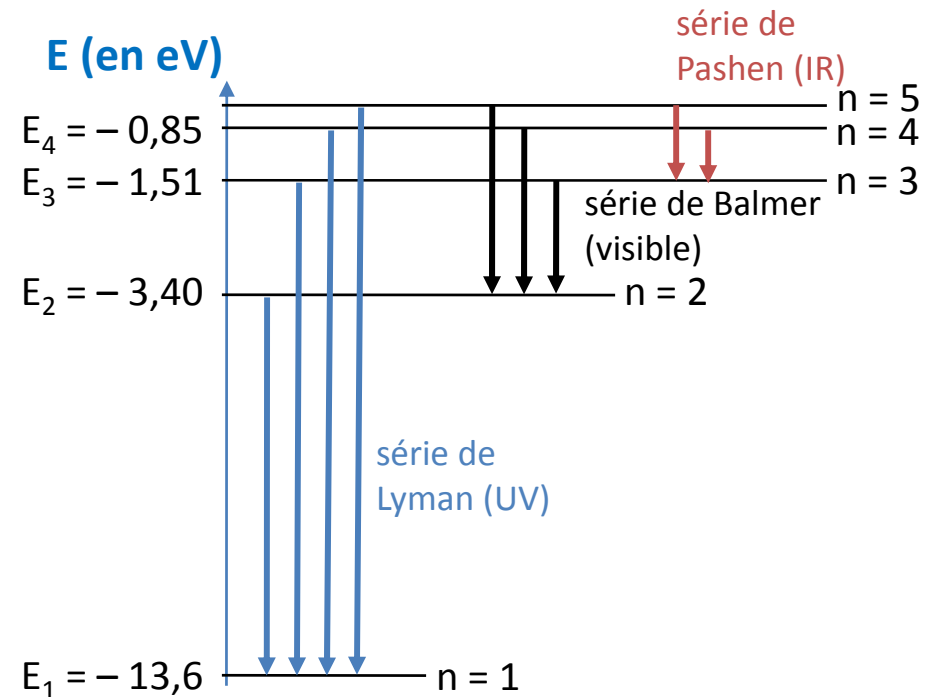
● série de Balmer (visible)

● $\lambda_{23} = 658 \text{ nm}$

● $\lambda_{24} = 487 \text{ nm}$

● $\lambda_{25} = 435 \text{ nm}$

● $\lambda_{26} = 411 \text{ nm}$



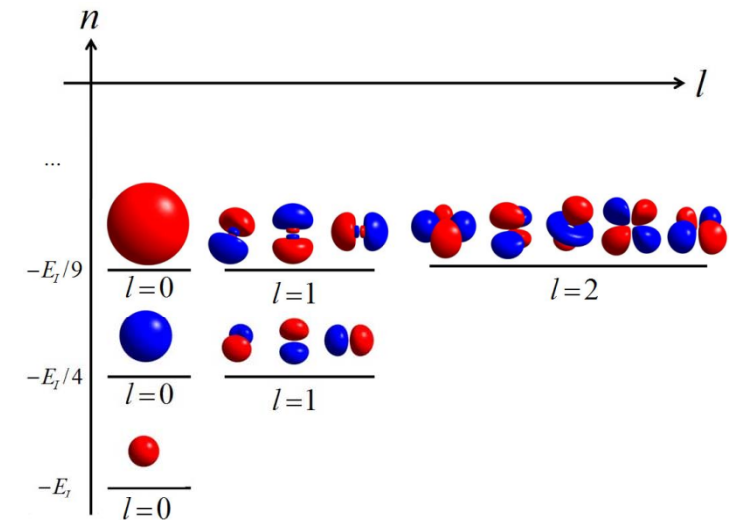
2.2 Modèle de Schrödinger

● modèle de Schrödinger (E. Schrödinger - 1925)

- modèle ondulatoire
- électron: **onde** associée à une fonction d'onde appelée **orbitale**
- carré norme fonction d'onde: **densité de probabilité de présence**
- position électron: **nuages de probabilité de présence**

● modèle de Schrödinger:

- stabilité atome
- forme des molécules, organisation des cristaux
- effets spectroscopiques



orbitales de l'atome d'hydrogène
(© Ecole Polytechnique – Physics Dept)

3. Le modèle nucléaire

3.1 Forces de cohésion nucléaires

● 3 forces en action dans le noyau

- interaction **nucléaire forte**
- interaction **nucléaire faible**
- interaction **électrostatique**

Interaction	Portée	Intensité
électromagnétique	infinie	10^{-4}
nucléaire forte	10^{-15} m	1
nucléaire faible	$< 10^{-18}$ m	10^{-7}

● **compétition** entre ces 3 interactions: **stabilité** ou **instabilité** noyau

3.1.1 Interaction nucléaire forte

- **force attractive:**

- « colle nucléaire »

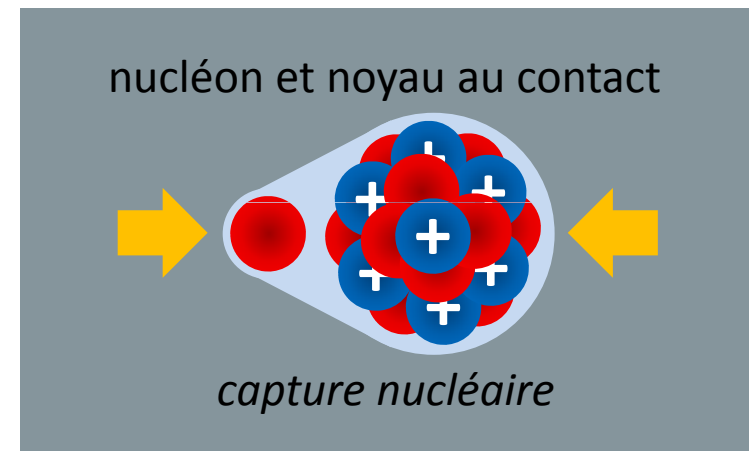
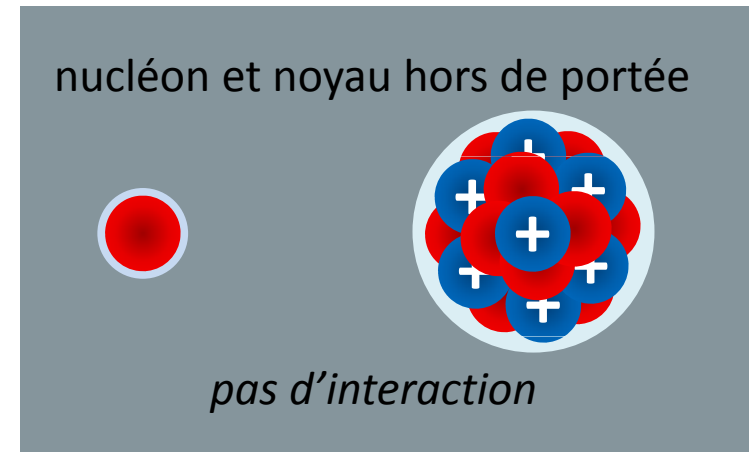
- **courte portée:**

- rayon d'action # 1.10^{-15} m

- **énergie:**

- E_{forte} $E_{forte} = -k_{forte} \frac{e^{-\mu r}}{r}$

- **cohésion nucléaire**



3.1.2 Interaction nucléaire faible

- force répulsive entre protons
- très courte portée:
 - rayon d'action # 1.10^{-18} m
- expression mal connue
- incompressibilité du noyau
- responsable désintégrations β

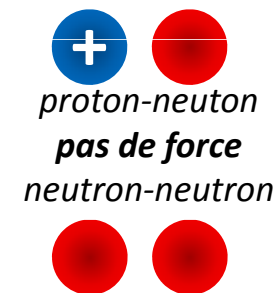
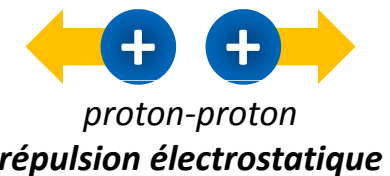
3.1.3 Interaction électrostatique

- force répulsive entre protons
- force et énergie:

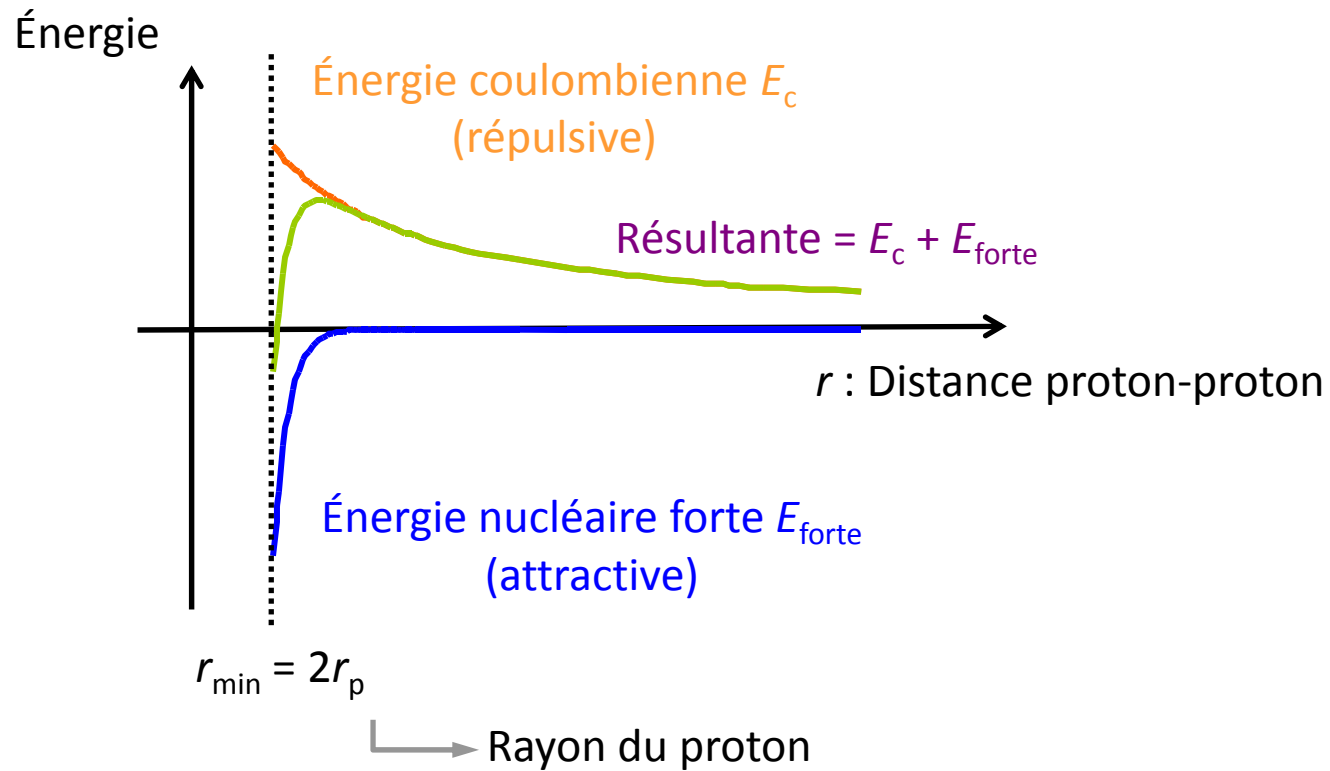
- force coulombienne F_c
 - énergie coulombienne E_c

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \quad E_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}$$

- instabilité du noyau



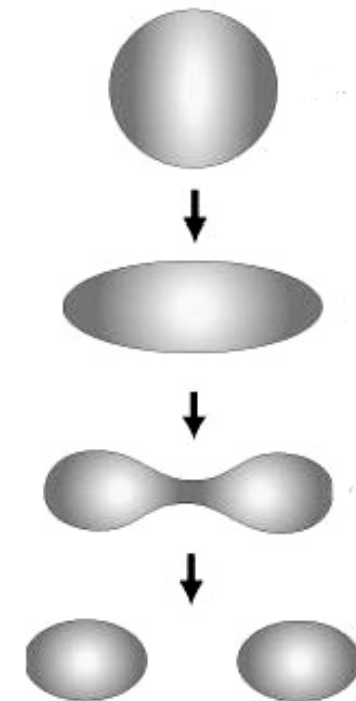
3.1.4 énergie d'interaction de 2 protons



3.2 Modèles nucléaires

3.2.1 modèle de la goutte liquide

- formule permettant d'exprimer les énergies de liaison en fonction de A
- **noyau = goutte d'eau** dont les molécules seraient les nucléons
 - force de Van der Waals = interaction forte
 - répulsion coulombienne
- **diminution tension superficielle** → rupture goutte
- permet d'expliquer la **fission** mais **pas la stabilité nucléaire**



fission spontanée d'un noyau lourd en deux noyaux légers

© Kenjiro Takada, Kyushu university

3.2.2 modèle en couches

- **modèle similaire à celui de Bohr pour l'atome**
- protons et neutrons sur différents niveaux d'énergies bien déterminées
- **noyau état excité**: passage nucléon état fondamental vers niveau d'énergie supérieure
- **nombre magique**: remplissage complet couches complètes même nombre quantique principal → (plus grande stabilité)
 - **plus grande stabilité**
 - *idem* gaz nobles dans modèle atomique
- permet d'expliquer la **stabilité** nucléaire mais **pas la fission**

3. Stabilité et instabilité du noyau

- assemblages nucléons

 - noyaux stables

 - noyaux instables = noyaux radioactifs

- noyaux radioactifs → désintégration

 - modification structure pour revenir vers stabilité

 - émission rayonnement ou particule

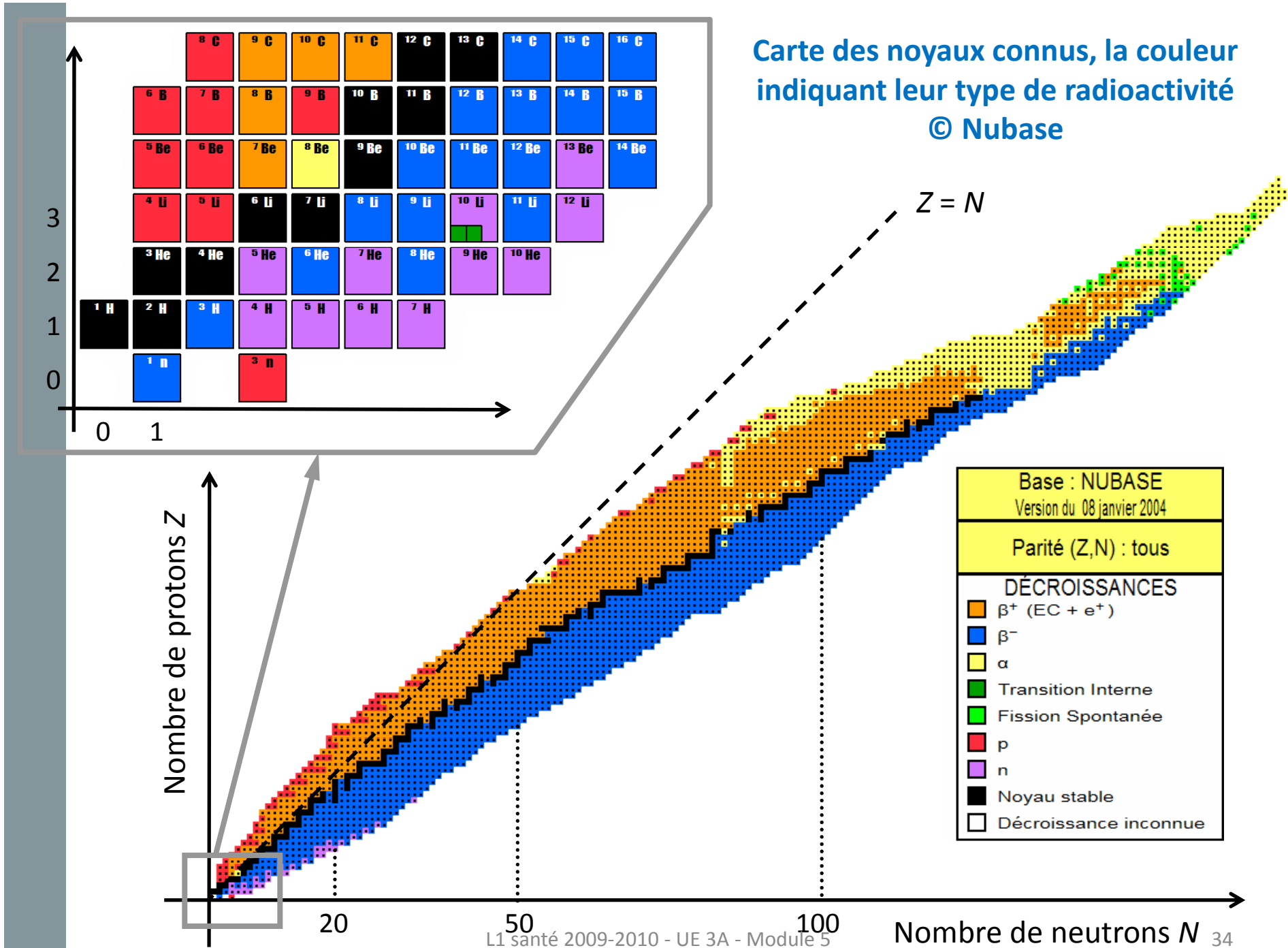
- pour $Z < 20$: noyaux stables au voisinage droite $Z = N$

- pour $Z > 20$: noyaux stables pour $N > Z$

- **parité**: environ **60% noyaux stables ont Z pair et N pair**
- **nombre magiques**: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126
 - valeurs de Z ou N telles que plus **isotopes ou isotones stables**
- 3000 noyaux identifiés dont environ **300 stables**
- sur les 118 éléments connus **38 n'ont pas d'isotopes stables**
 - Technécium (Tc) $Z = 43$
 - Prométhium (Pm) $Z = 61$
 - éléments à partir du Bismuth (Bi) $Z \geq 83$

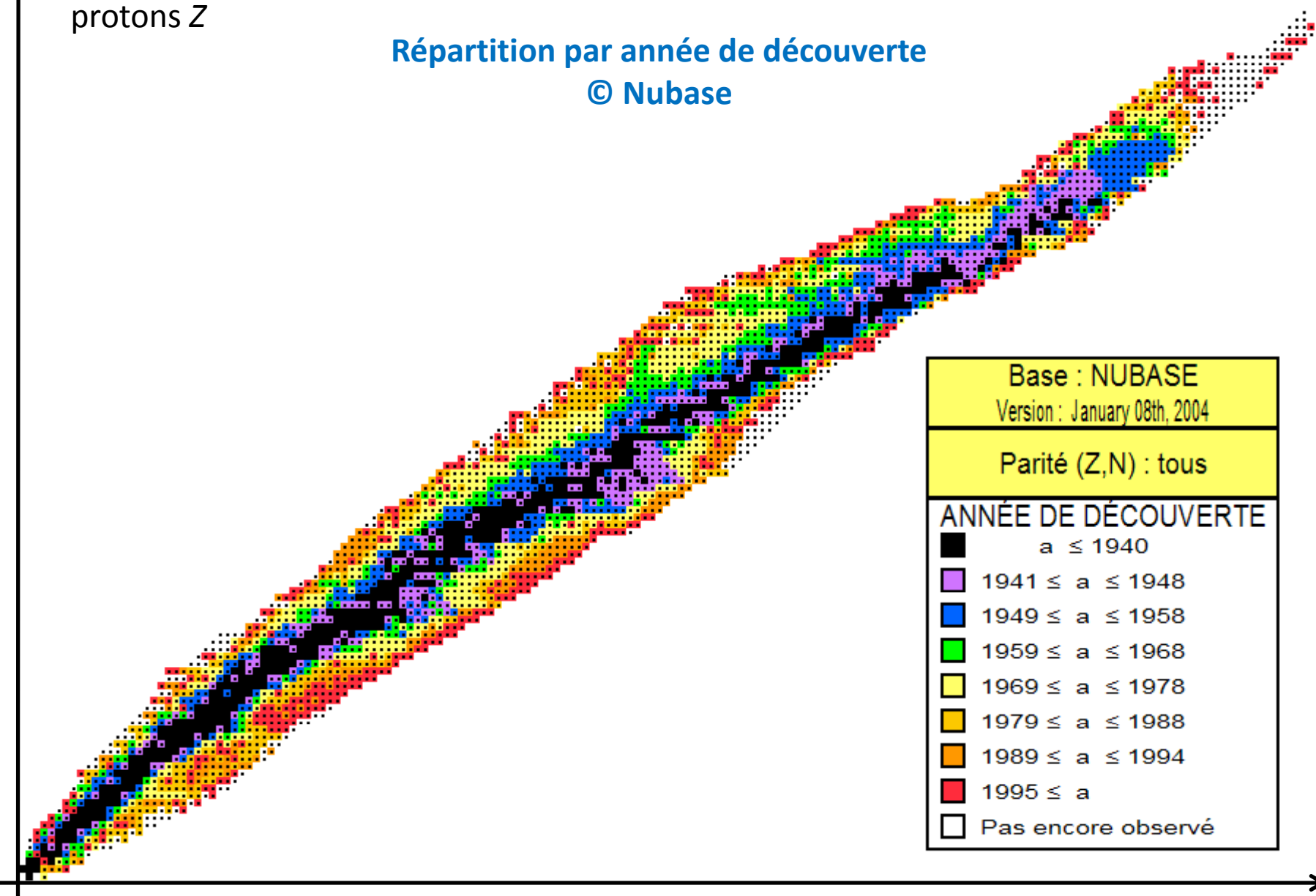
Carte des noyaux connus, la couleur indiquant leur type de radioactivité

© Nubase



Nombre de
protons Z

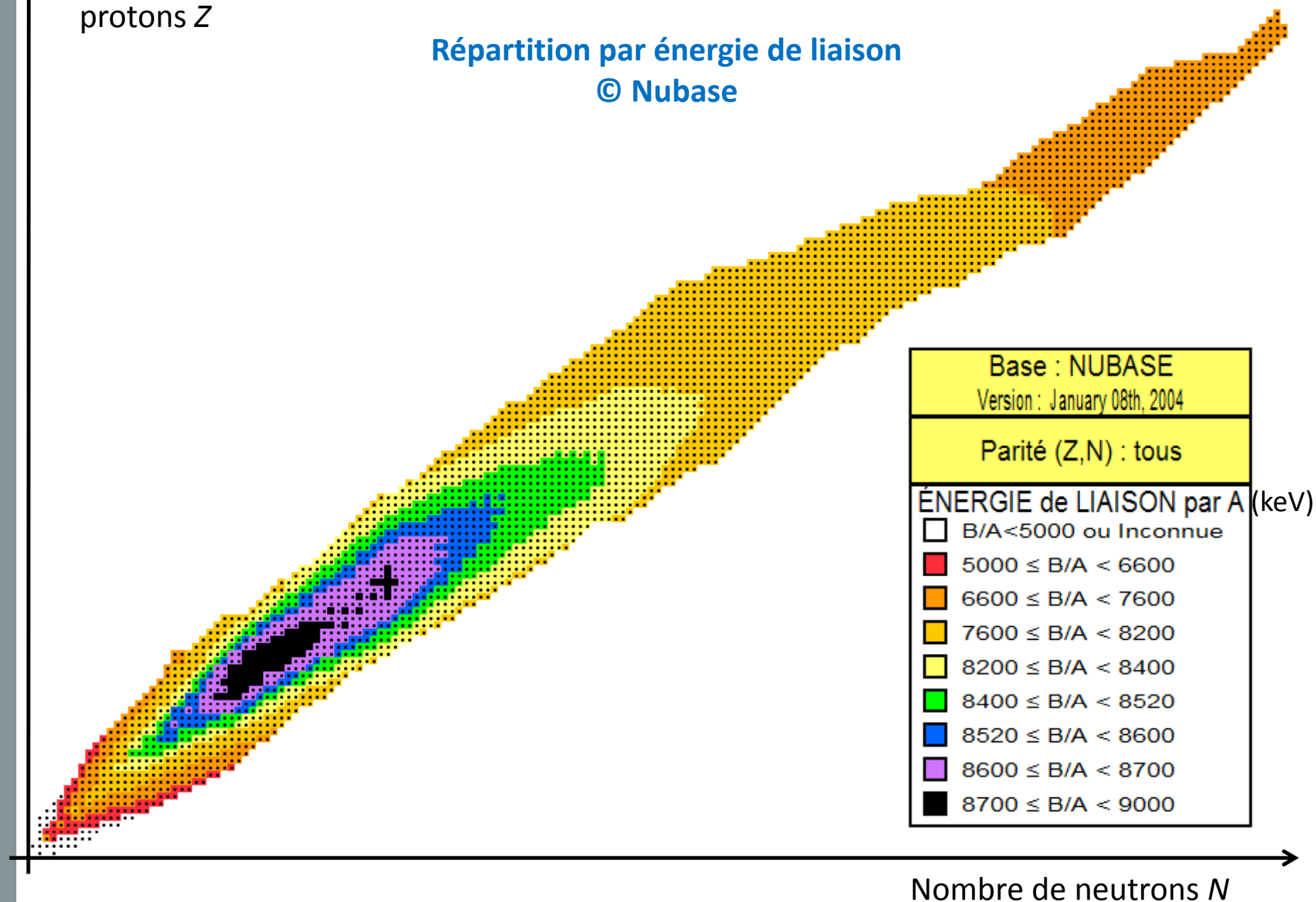
Répartition par année de découverte
© Nubase



Nombre de neutrons N

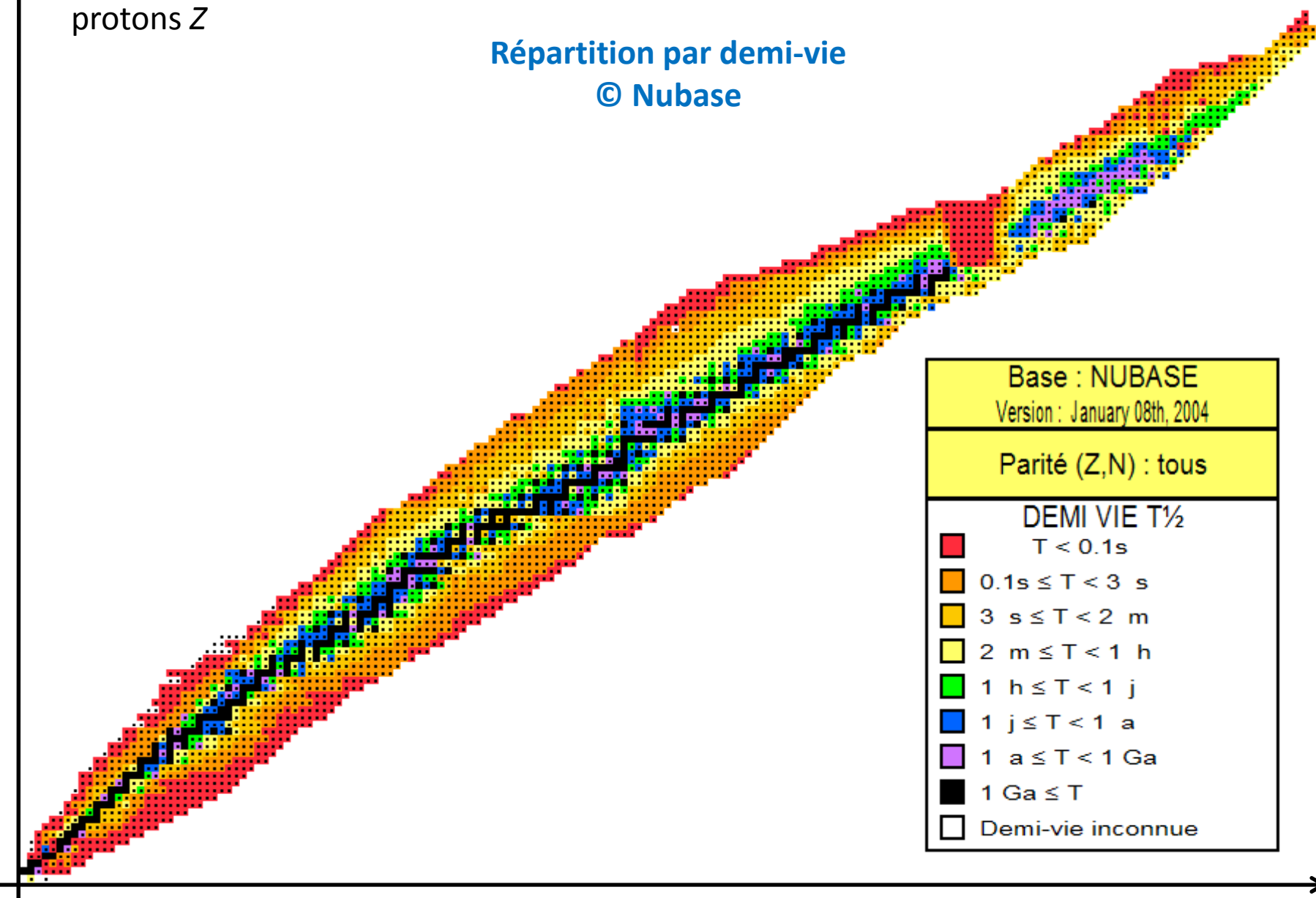
Nombre de
protons Z

Répartition par énergie de liaison
© Nubase



Nombre de
protons Z

Répartition par demi-vie
© Nubase



Nombre de neutrons N