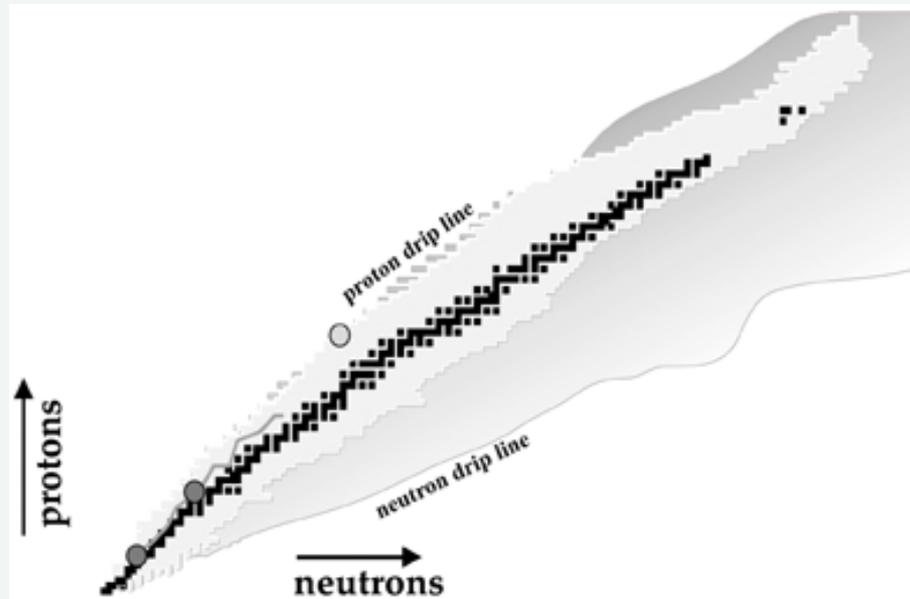


Chapitre 2

Masse, énergie et stabilité des noyaux atomiques



Plan

-  Masse des noyaux, énergie de liaison
-  Faits expérimentaux
-  Modèle de la goutte liquide
-  Vallée de stabilité

1- Masse et énergie de liaison

Rappel : En physique nucléaire on n'utilise pas les unités SI

- Les énergies sont mesurées en multiples d'eV:
keV (10^3 eV) MeV (10^6 eV) GeV (10^9 eV) TeV (10^{12} eV)
Physique nucléaire Physique des particules
- Les masses s'expriment en unités de MeV/c² ou GeV/c² (rappel: $m=E/c^2$)
(fréquemment le /c² est omis)
- Les masses nucléaires sont souvent données en unité de masse atomique
1 unité de masse atomique (u) = masse d'une atome de ¹²C/12

$$1u = 1g/\mathcal{N}_A = 1.6610^{-27} \text{ kg} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$$

c'est un peu moins que la masse d'un proton ou d'un neutron à cause de l'énergie de liaison.

- $m_e = 9.1094 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2 = \text{"0.511 MeV"} = 0.00055 \text{ u}$
 $m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 938.28 \text{ GeV}/c^2 = 1836.1 m_e = 1.00728 \text{ u}$
 $m_n = 1.6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 939.57 \text{ GeV}/c^2 = 1838.7 m_e = 1.00728 \text{ u}$

1.1 Energie de liaison

- L'énergie de liaison B est l'énergie requise pour séparer un noyau en ses constituants (protons et neutrons)

$$m({}_Z^A\text{X})c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B(A, Z)$$

- Le concept d'énergie de liaison est très important. Il apporte des informations sur
 - Les forces entre les nucléons
 - La stabilité du noyau
 - L'énergie libérée ou requise dans les désintégrations ou les réactions nucléaires
- Si $B(A, Z) > 0$, le noyau est lié. C'est une condition nécessaire mais pas suffisante pour la stabilité

🌐 Quelques valeurs numériques :

🌐 $M(^4\text{He}) = 3728.4 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow B=28.30 \text{ MeV}$

🌐 $M(^2\text{H})=1876.12 \text{ MeV}/c^2 \rightarrow B=2.22 \text{ MeV}$

🌐 $B(^{12}\text{C})=12u-6m_p-6m_n-6m_e = 92.16 \text{ MeV}=1.477 \cdot 10^{-11}\text{J}$
valeur faible, mais une mole de ^{12}C correspond à $8.9 \cdot 10^{12}\text{J}$
i.e. $2.5 \cdot 10^6 \text{ kWh}$! i.e. 2 kt TNT

1.2- Energie de séparation

L'énergie de séparation S est l'énergie requise pour arracher un nucléon (ou une particule α) d'un noyau.

$$S / c^2 = \sum m_{\text{finales}} - \sum m_{\text{initiales}}$$

- Energie de séparation = énergie d'extraction ($S > 0 \rightarrow$ coût en énergie)
- Même si un noyau a $B(A,Z) > 0$, il ne sera pas stable si il y a une S_i négative
- Les énergies de liaison et les énergies de séparation sont mesurées expérimentalement en utilisant des techniques de spectroscopie de masse (pour les noyaux stables) ou via la balance énergétique des réactions nucléaires et des désintégrations (pour les noyaux instables)

1.4- Réaction nucléaire et chaleur de réaction

🌐 Réaction nucléaire : $a+X \rightarrow b+Y$ or $X(a,b)Y$

a : projectile

X : cible

b, Y : particules émergentes

🌐 Chaleur de réaction (Q):
$$Q = \sum_i M_i c^2 - \sum_f M_f c^2$$

🌐 $Q > 0 \rightarrow$ réaction exothermique

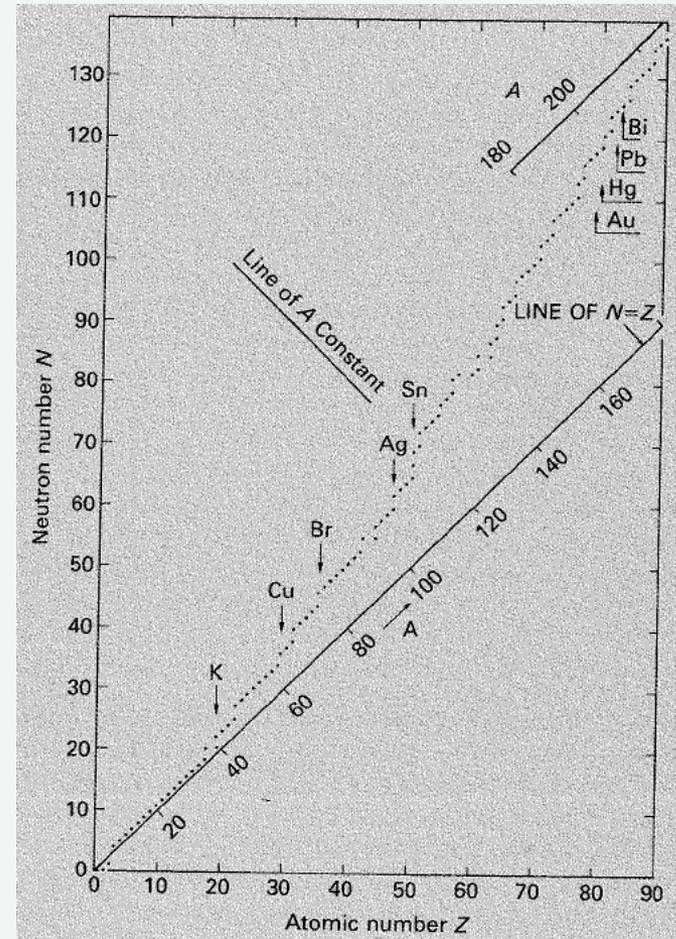
🌐 $Q < 0 \rightarrow$ réaction endothermique

Faits expérimentaux

Les noyaux stables

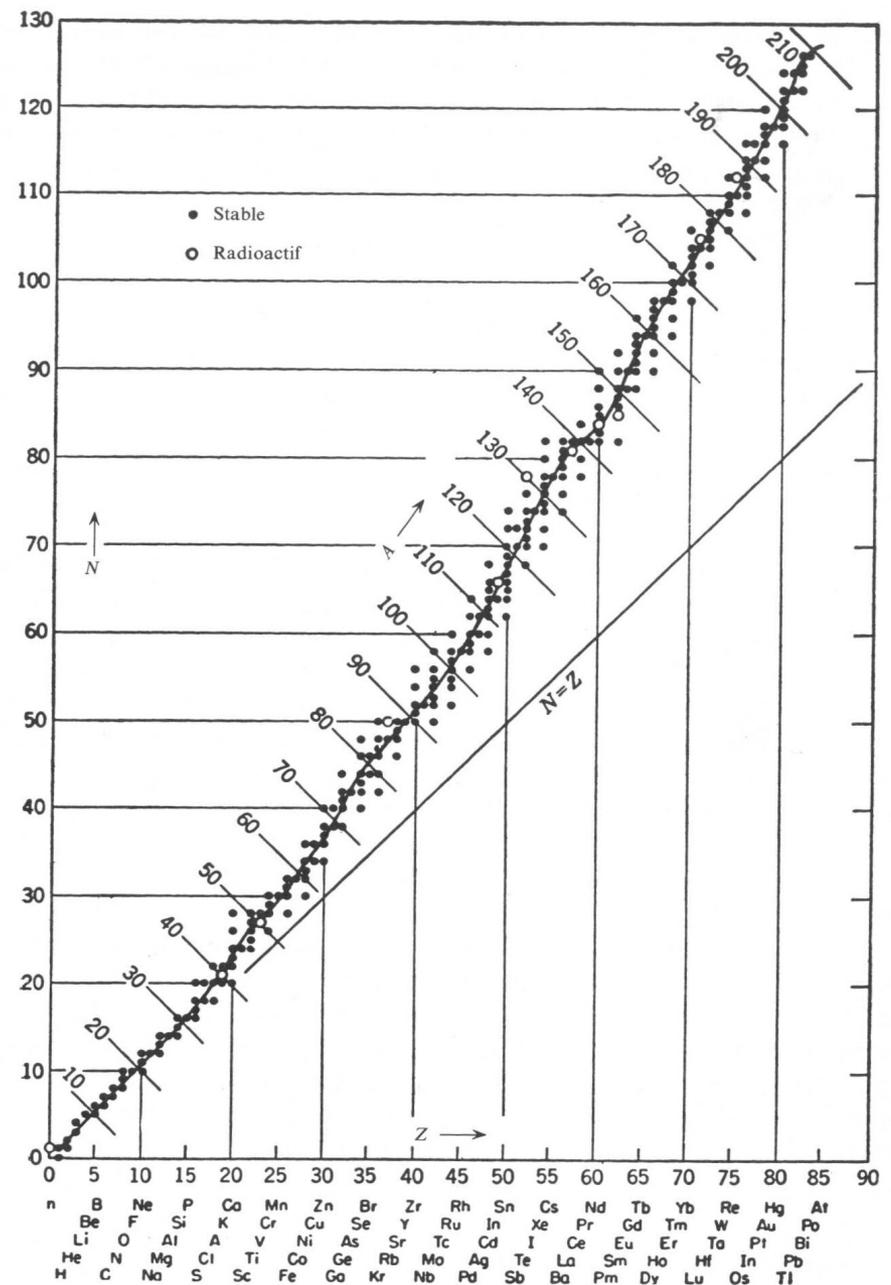
Carte (Z,N) des noyaux stables
(A impair)

- Il n'y a qu'un seul isobare pour chaque valeur de A
- La ligne passant par la position des noyaux stables est appelée ligne de stabilité



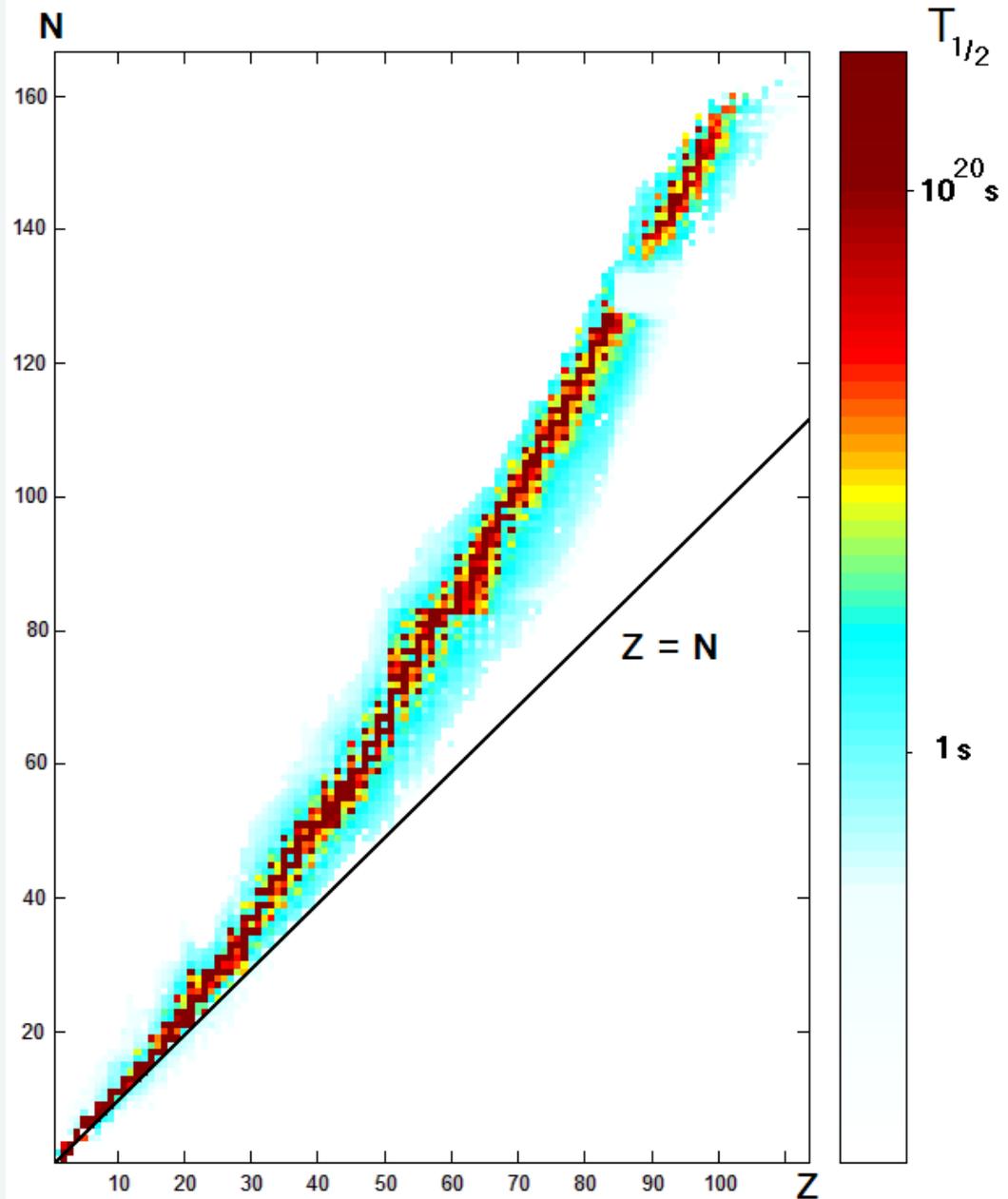
Charte des noyaux stables ou de longue durée de vie

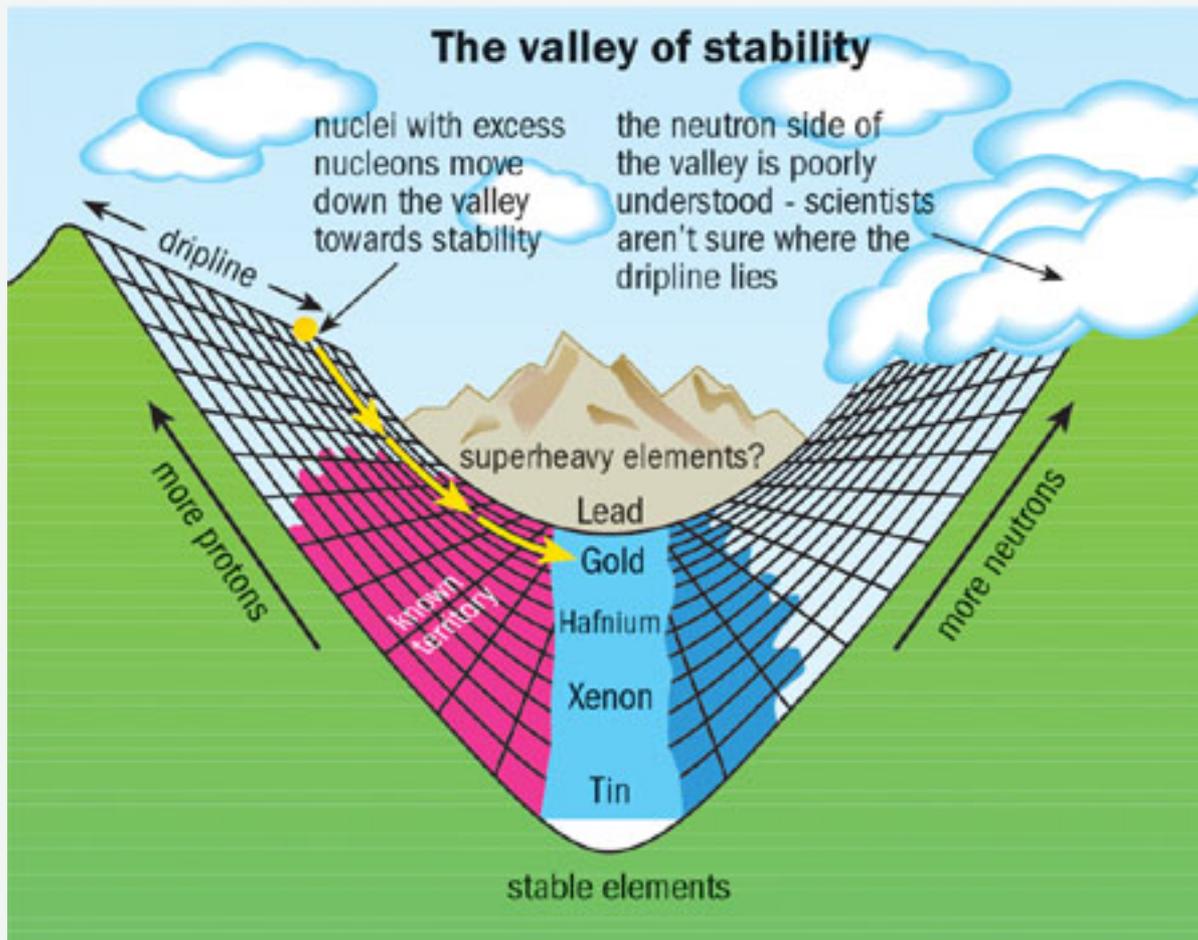
Pour les noyaux pair (A pair), il peut y avoir plus d'un isobare stable



- En bombardant les noyaux stables avec des projectiles nucléaires, on crée des radioisotopes artificiels
- Plus ces nucléides sont loin de la ligne de stabilité, plus leur temps de vie est court

⇒ Vallée de stabilité





Principales observations

- 80 isotopes ont au moins un élément stable.
De l'hydrogène ($Z = 1$) au plomb ($Z = 82$) à l'exception de Tc ($Z = 43$) et Pr ($Z = 59$).
- 94 éléments existent naturellement sur terre, jusqu'à le plutonium ($Z = 94$).
- Il y a 269 isotopes stables et 339 isotopes sur terre
16 éléments ont un seul isotope, d'autres comme l'étain ($Z = 50$) a 10 isotopes stables
- parmi les noyaux stables :
 - 158 ont Z et N pairs (noyaux pairs-pairs)
 - 107 ont Z ou N pair (noyaux impair)
 - 4 ont Z et N impair (noyaux impair-impair) ${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{14}\text{N}$
- Il n'y a qu'un seul isobare stable pour chaque valeur impaire de A
- $N = Z$ pour les noyaux légers. Noyaux plus lourds ont $N \approx Z$ $N/Z \sim 1,5$
- Pour certaines valeurs particulières de N et Z , il y a un grand nombre d'isotopes ou d'isotones.

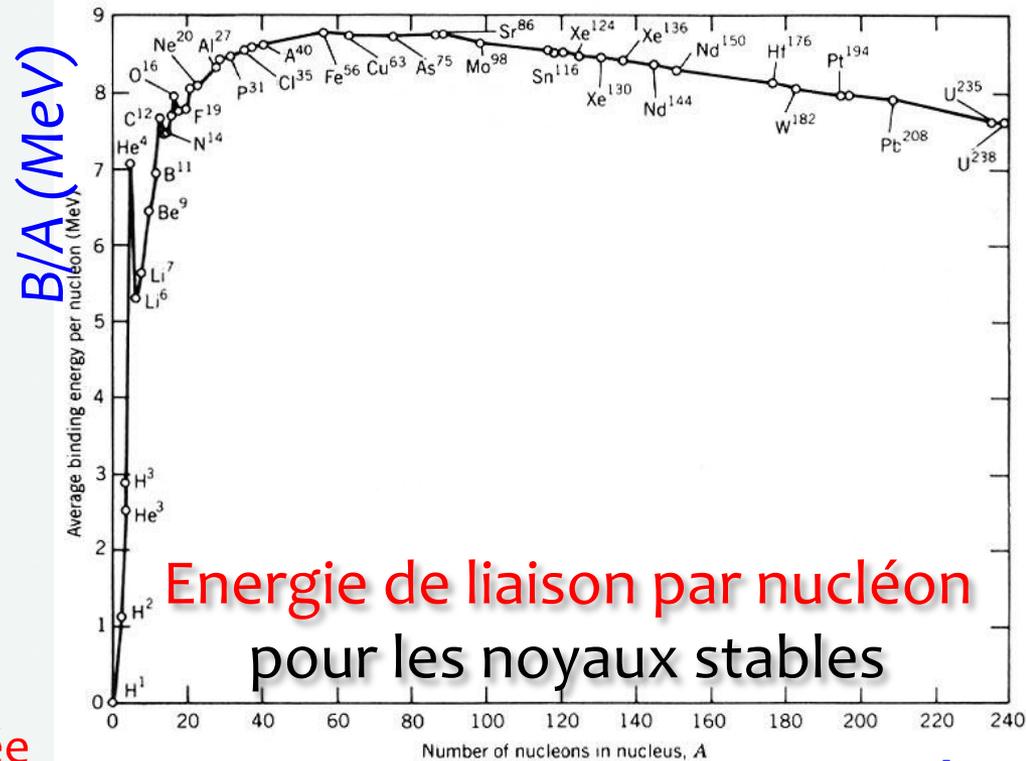
Energies de liaison

Définition : $m\left(\frac{A}{Z}X\right)c^2 = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B(A, Z)$

- ✓ $B/A \approx$ constant ≈ 8 MeV/nucleon pour les noyaux $A > 20$
- ✓ Large maximum autours de $A \approx 60$ (Fe, Co, Ni), $B/A \approx 8.7$ MeV

$B/A \approx$ constant – implique que dans un noyau les nucléons ne sont liés qu'au nucléons voisins

- ⇒ La force nucléaire est à courte portée et saturée (chaque nucléon interagit avec un nombre limité de voisins, pas avec tous les nucléons)



A

Modèle de la goutte liquide

Goutte de liquide

- Courte portée des forces intermoléculaires
- La densité est indépendante de la taille de la goutte
- La chaleur requise pour évaporer une masse donnée est indépendante de la taille de la goutte

Noyau

- Courte portée de la force nucléaire
- La densité est indépendante de la taille du noyau
- $B/A \approx \text{constant}$

Formule de masse semi-Empirique

- Cette formule est utilisée pour approximer la masse des noyaux atomiques. Comme le nom le suggère, elle est partiellement basée sur des arguments théoriques et se repose partiellement sur des mesures empiriques.
- Elle est basée sur une analogie avec une goutte de liquide. Elle a été formulée pour la première fois en 1935 par le physicien allemand Carl von Weizsäcker, et bien que des raffinements aient été apportés au cours du temps, la forme de la formule reste la même actuellement

$$B(A, Z) = \underbrace{u_v A - u_s A^{2/3} - u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}}_{\text{Partie goutte liquide}} - \underbrace{u_T \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta}_{\text{Termes nucléaire spécifiques}}$$

- U_v, u_s, u_c, u_T et δ sont des paramètres en principe indépendants de A et Z , dont les valeurs numériques doivent être ajustées pour reproduire les masses nucléaires expérimentales.

Terme de volume

$$B_{\text{vol}} = u_v A$$

- Origine : la force nucléaire forte affectant à la fois les neutrons et les protons.
- Augmente B et réduit la masse d'une valeur constante par nucléon.
- Le terme de volume est proportionnel au nombre de nucléons:
 - Indépendance de charge de la force nucléaire forte
 - Courte portée et force saturée.
 - $B/A \approx \text{Constant}$ au lieu de $B/A \approx A$ pour les interactions de longue portée

Termes correctifs

- Terme de surface : $B_{\text{surf}} = -u_s A^{2/3}$
 - Origine : Ce terme est aussi basé sur la force nucléaire forte, c'est une correction au terme de volume qui réduit B.
 - Le terme de volume suggère que chaque nucléon interagit avec un nombre constant de nucléons, indépendamment de A. C'est vrai pour les nucléons qui sont profondément dans le noyau. En revanche, les nucléons vers la surface du noyau ont moins de voisins proches, justifiant cette correction. Ce terme peut aussi être considéré comme un terme de tension superficielle. En effet un mécanisme similaire crée la tension superficielle dans les liquides.
- Terme coulombien (ou électrostatique) : $B_{\text{coul}} = -u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$
 - Origine : Répulsion électrostatique entre les protons
 - Réduit B

A ce point, nous avons bâti un modèle de goutte liquide basique

$$B(A, Z) = u_v A - u_s A^{2/3} - u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}$$

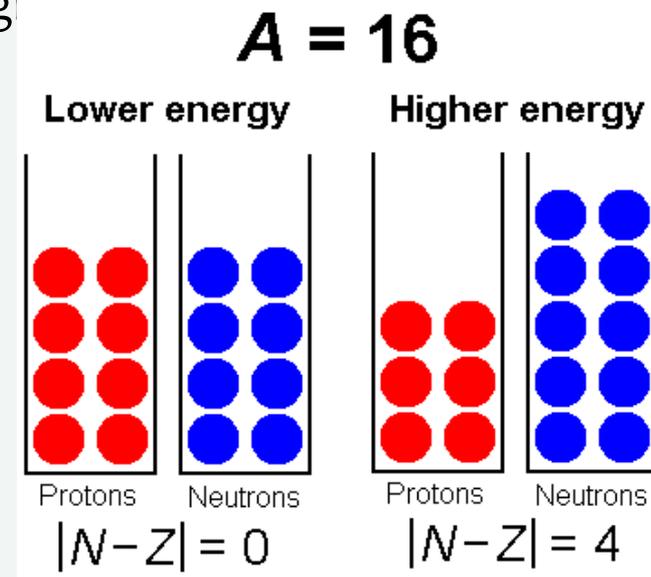
Il n'explique pas deux faits expérimentaux :

1. $N \approx Z$
2. Les nucléons ont tendance à s'apparier

Terme d'asymétrie

- Origine quantique : quantification des niveaux d'énergie et principe de Pauli
- Puisque les protons et les neutrons sont confinés dans le volume nucléaire, leurs énergies sont discrètes.
- 2 fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique → Au fur et à mesure qu'on « ajoute » des nucléons, ces nucléons doivent occuper des niveaux de plus haute énergie, accroissant l'énergie totale du noyau (et décroissant l'énergie de liaison).

- Protons et neutrons occupent différents états quantiques. Si il y a plus de neutrons que de protons, certains neutrons auront une énergie plus haute que les états de proton disponibles:
→ Transformer des neutrons en protons diminuerait significativement l'énergie.
Le déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons conduit à une énergie plus élevée pour un nombre donné de nucléons.
C'est la base du terme d'asymétrie.

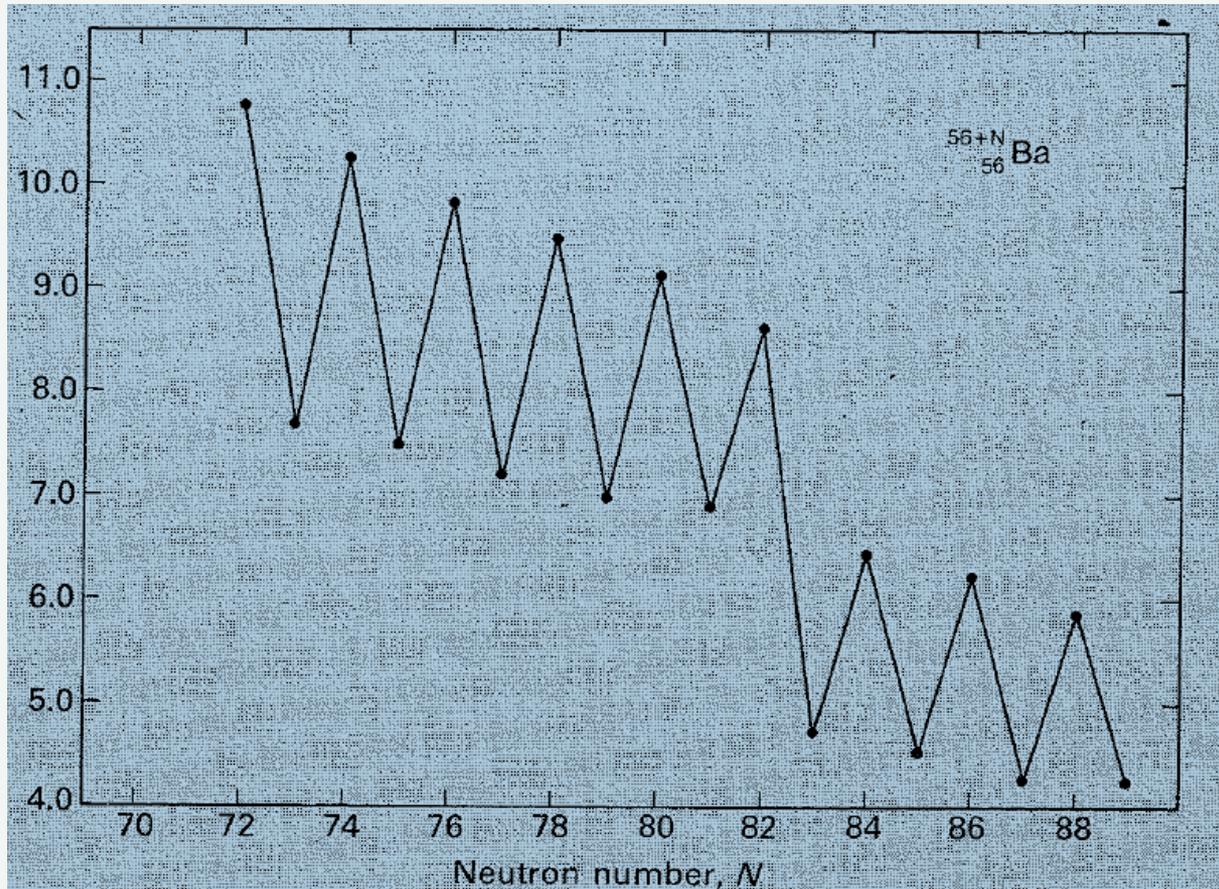


Terme d'appariement

$$B_{\text{pair}} = \begin{cases} +\delta & \text{even-even nuclei} \\ 0 & \text{odd-A nuclei} \\ -\delta & \text{odd-odd nuclei} \end{cases} \quad \text{with } \delta = \delta(A) = u_p A^{-1/2}$$

- 🌐 L'interaction d'appariement favorise énergétiquement la formation de paires de nucléons identiques (pp, nn)
- 🌐 Cet effet provient d'une composante de l'interaction forte (couplage spin-orbite)
- 🌐 Cette forme est empirique

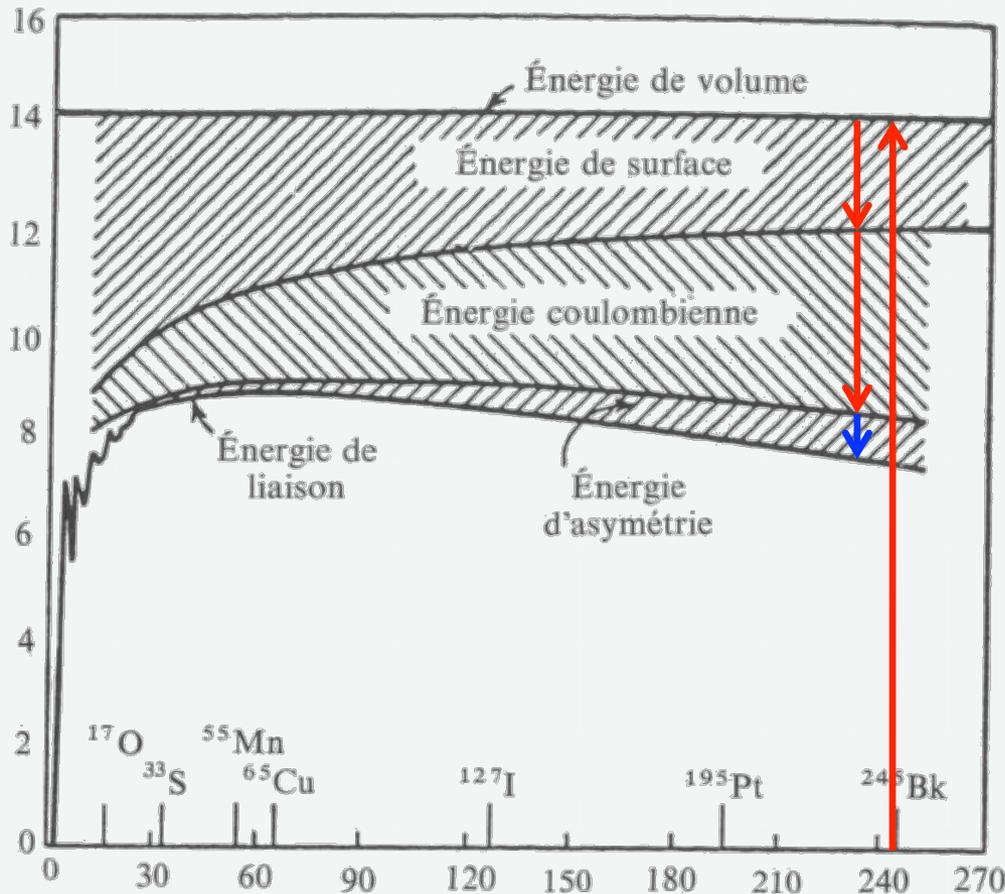
Energie de séparation du dernier neutron dans les isotopes de ${}_{56}\text{Ba}$



4 The energy required to remove the last neutron (the **neutron separation energy**) from the isotopes of barium (${}_{56}\text{Ba}$). This energy is about 2 MeV greater when N is even than when N is odd. This 2 MeV represents the energy required to break the pairing energy, which is favoured for like nucleons. The irregularity at $N=82$ is one of the effects that

La formule de masse semi-empirique

$$B(A, Z) = u_v A - u_s A^{2/3} - u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - u_T \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta$$



- Cette formule fonctionne bien pour les noyaux avec $A > 20$.
- Pour les noyaux très légers, l'accord est mauvais: Trop peu de nucléons pour permettre une description au terme de goutte

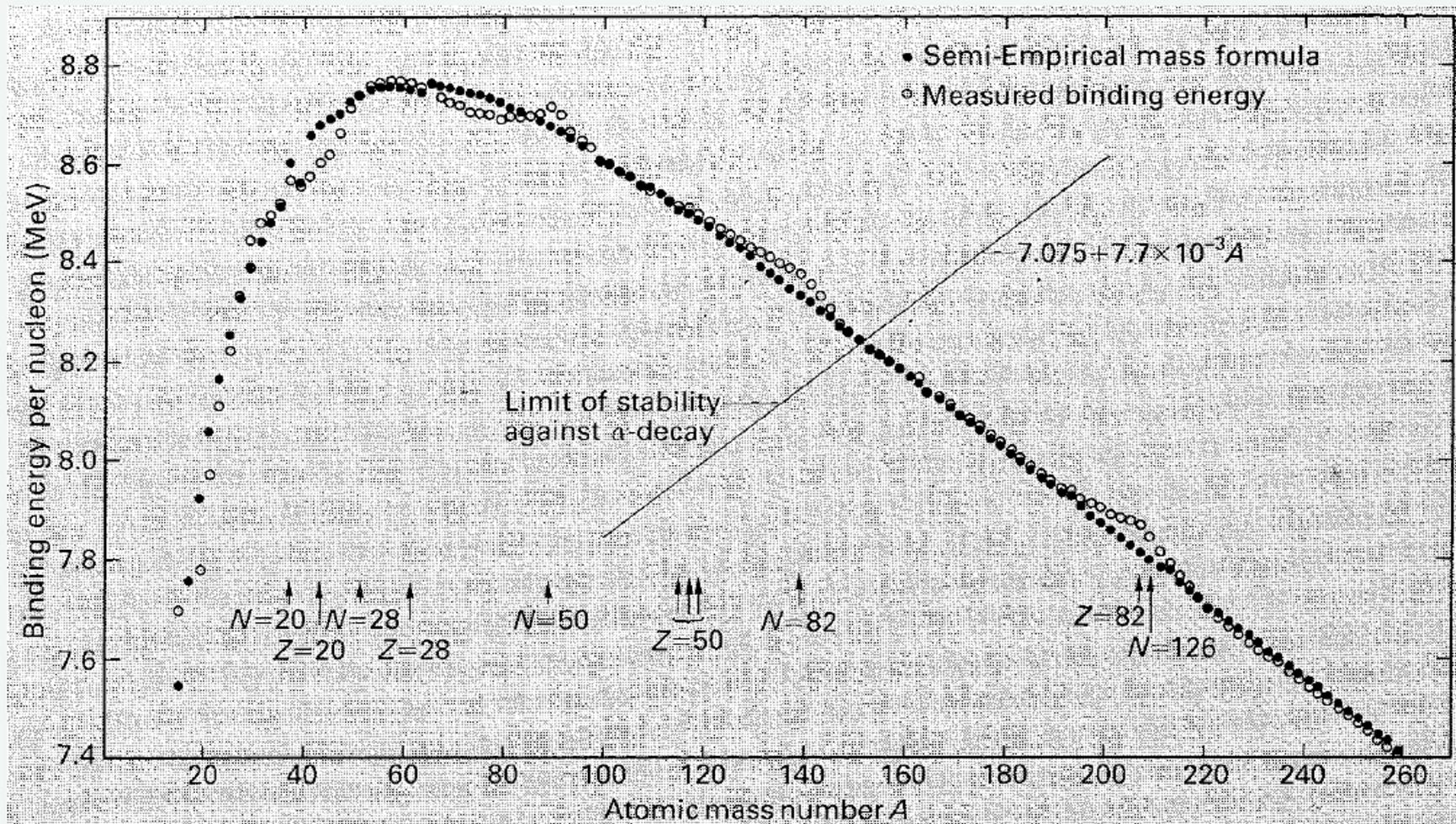
A propos des paramètres :

- Comme ils sont déterminés à partir des données expérimentales, ils peuvent avoir différentes valeurs suivant la méthode utilisée pour leur extraction.
- Exemple de 3 jeux de paramètres (donnés en MeV).

	Least square fit	Wapstra	Rohlf
u_v	15.8	14.1	15.75
u_s	18.3	13	17.8
u_c	0.714	0.595	0.711
u_T	23.2	19	23.7
u_p	12	X	X
$\delta_{\text{even-even}}$	X	33.5	11.18
$\delta_{\text{odd-odd}}$	X	-33.5	-11.18
$\delta_{\text{even-odd}}$	X	0	0

- Wapstra: Atomic Masses of Nuclides, A. H. Wapstra, Springer, 1958
- Rohlf: Modern Physics from a to Zo, James William Rohlf, Wiley, 1994

Energie de liaison par nucléon en fonction de A pour les noyaux impairs entre A=15-259



Pour $A > 20$, dans la majorité des cas, la précision est meilleure que 0.1 MeV