

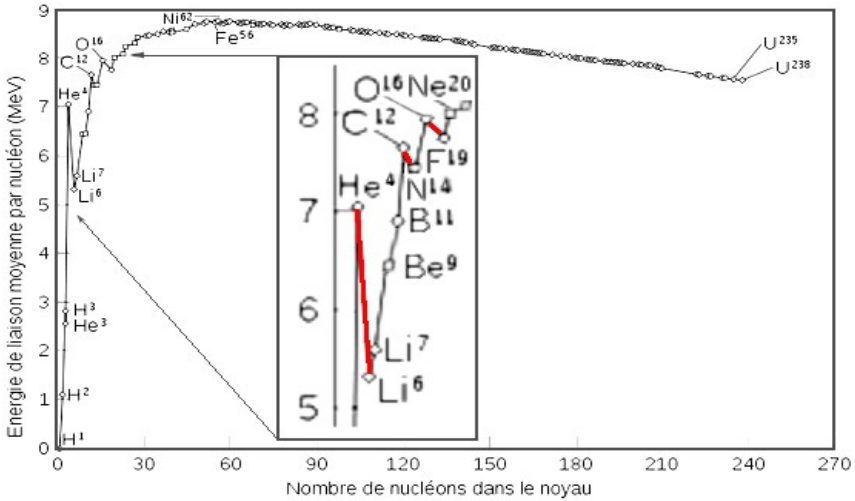
ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

Énergies de liaison des noyaux atomiques

La séquence évolutive complète des noyaux atomiques se traduit ainsi en terme d'énergie de liaison par nucléon (Courbe d'Aston 1927) :

Fig. 9.36 : Énergies de liaison par nucléon des noyaux atomiques

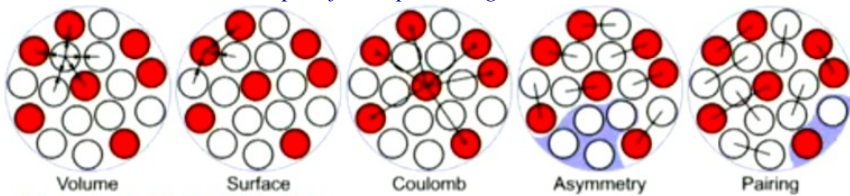
Source : WIKIPÉDIA: https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_d'Aston



Les traits rouges indiqués sur l'agrandissement montrent trois fortes anomalies dans la progression de l'énergie de liaison par nucléon des noyaux atomiques les plus légers : celles du **lithium 6**, de l'**azote 14** et du **fluor 19**. Ce n'est qu'à partir du noyau de l'atome de **néon 20** que la courbe d'Aston prend un aspect quasi régulier, si on néglige certaines variations que tente d'expliquer la formule semi-empirique de Bethe-Weizsäcker :

Fig. 9.37 : Formule de Bethe-Weizsäcker

Source : WIKIPÉDIA: https://fr.wikipedia.org/wiki/Formule_de_Weizsäcker



Formule de Bethe-Weizsäcker :

$$BE = - \underbrace{a_1 A}_{\text{Volume}} + \underbrace{a_2 A^{\frac{2}{3}}}_{\text{Surface}} + \underbrace{a_3 \frac{Z(Z-1)}{A}}_{\text{Coulomb}} + \underbrace{a_4 \frac{(N-Z)^2}{A}}_{\text{Asymmetry}} \pm \underbrace{a_5 A^{-\frac{1}{2}}}_{\text{Pairing}}$$

Paramètres déterminés expérimentalement :

$$a_1 \approx 15.56 \quad ; \quad a_2 \approx 17.23 \quad ; \quad a_3 \approx 0.7 \quad ; \quad a_4 \approx 23.6 \quad ; \quad a_5 \approx 34.0$$

THÉORIE NR

Cinq hypothèses sont prises en compte par cette formule, essentiellement dans le cadre théorique du *Modèle de la goutte liquide*. Il est alors intéressant de les comparer avec celles du *Modèle de la bulle de savon* et de sa version plus « architecturée » dite du « *vieux galion* ».

Volume et surface : La *bulle de savon* est effectivement une sorte de « traitement de surface » et la prise en compte du volume interne se fait pour une raison très précise, celle de permettre de loger les *neutrons de lest* — en raison de l'évolution de la pression électromagnétique interne, différente de celle de la tension superficielle en surface —, ce qui nous a donné une explication logique au fait que les différents *isotopes* ne produisent quasiment pas de changements des propriétés chimiques des atomes, ce qui sera l'objet d'une étude particulière dans la section à venir intitulée *Architecture des atomes*.

Répulsion coulombienne : Ce problème n'intervient pas dans le *Modèle de la bulle de savon*, en raison du choix de mailler la surface par des polygones possédant un nombre pair de cotés (carrés, hexagones, octogones), en application des principes exposés dans le premier tome de la théorie NR, unifiant la *force électromagnétique* et la *force nucléaire forte résiduelle* agissant entre nucléons. En revanche, dans le modèle plus élaboré du « *vieux galion* », cette répulsion coulombienne agit sur le positionnement des nucléons extérieurs à la surface d'un noyau atomique, qui sont les *protons et neutrons de pointe*, les *neutrons de lest*, et les *neutrons chaloupe* (voir Fig. 9.9 - Page 19 : *Détails de l'architecture de la « peau » des noyaux atomiques*).

Asymétrie : L'article WIKIPÉDIA *Formule de Weizsäcker* indique :

En réalité, un effet quantique va jouer un rôle : les nucléons se trouvent sur des *niveaux d'énergie*, ce qui fait qu'un surplus de neutrons va augmenter leur énergie.

Cette quatrième hypothèse repose donc sur le *Modèle en couche* de la structure nucléaire, dans une vision quasiment copiée sur celle des *orbitales atomiques*. Une certaine *asymétrie entre protons* sera prise en compte dans l'étude à venir de l'*architecture des atomes*.

Appariement : Suite de l'article WIKIPÉDIA *Formule de Weizsäcker* :

Un deuxième effet quantique joue un rôle dans l'énergie de liaison : les nucléons ayant un spin demi-entier ont tendance à *s'apparier* deux à deux, pour se grouper préférentiellement en nombre pair. Ainsi, un nombre impair de neutrons ou de protons sera moins stable.

ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

Dans le modèle de la théorie NR, les nombres de neutrons ou de protons présents en surface d'un noyau atomique sont *a priori* rigoureusement égaux, et pairs en raison du principe de maillage. En dehors de cette surface, les *protons de pointe* sont au nombre de deux, ce qui ne nuit pas à la parité. En revanche le nombre de *neutrons de lest* ou de *neutrons chaloupe* peut être pair ou impair, sans nuire à la stabilité. Mais cette vision est simplificatrice, car elle ne concerne que les noyaux atomiques que nous avons étudiés dans la série des graphes polaires et équatoriaux dits *de base*. Avec l'étude prochaine de la *nucléogenèse* apparaîtront des protons venant se loger au centre des mailles hexagonales ou octogonales, ce qui permettra d'accéder à la géométrie des noyaux atomiques possédant un nombre *impair* de protons.

Au delà de ces considérations très « mathématiques » et fort peu « géométriques » de la formule de Weizsäcker — puisque les nucléons sont traités comme une sorte de « sac de billes en vrac » — regardons comment nous pourrions établir une correspondance entre la courbe d'Aston et les principes de la théorie NR qui viennent d'être exposés. Rappelons que l'*énergie de liaison par nucléon* se calcule en faisant la différence entre la masse mesurée d'un noyau atomique dans lequel les nucléons sont liés et la masse totale des nucléons présents considérés comme libres (notion de *défait de masse*).

Comme il vient d'être indiqué : « *Ce n'est qu'à partir du noyau de l'atome de **néon 20** que la courbe d'Aston prend un aspect quasi régulier* ». C'est également à partir de la *coupe longitudinale du noyau de l'atome **néon 20*** que le volume interne des noyaux atomiques devient suffisant pour y loger les deux neutrons de pointe tout en accolant l'ensemble des nucléons, inaugurant ainsi la genèse des noyaux atomiques dits *sphériques*. (voir Fig. 9.32 - Page 39 : Coupes longitudinales des noyaux atomiques).

En fait, les noyaux atomiques du *carbone 12*, de l'*oxygène 16* et du *néon 20* peuvent être regardés respectivement comme des juxtaposition de deux, trois puis quatre noyaux de l'atome d'*hélium 4* surmontés de deux protons de pointe ; mais faute de place suffisante, les neutrons de pointe agissent comme des *écarteurs* empêchant les noyaux d'*hélium 4* d'entrer en contact, ce qui permet d'expliquer les trois anomalies soulignées en rouge dans le détail encadré de la courbe d'Aston (voir Fig. 9.33 ci-dessus).

THÉORIE NR

La théorie NR étant toujours friande de ce qui a été nommé dès le sous-titre de couverture *logique interne*, la question se pose de savoir comment établir un lien avec l'approche d'Aston qui se base sur une notion d'énergie — en l'espèce l'énergie de liaison par nucléon — dont l'équation aux dimensions est la suivante : $\mathbf{M L^2 T^{-2}}$ (SI) soit $\mathbf{L^3 T^{-3}}$ (TNR).

La théorie NR a introduit avec l'étude de l'architecture des fermions, imagée par des tracés régulateurs, la notion de *tension superficielle*, avec pour équation aux dimensions : $\mathbf{M T^{-2}}$ (SI) et $\mathbf{L T^{-3}}$ (TNR).

Il semble donc possible de passer de la notion d'énergie de liaison à celle de *tension superficielle* en divisant cette énergie par une surface caractéristique d'un noyau atomique.

Le tableau suivant exploite cette idée :

Tab. 9.2 : Énergies de liaison par nucléon (Aston) et de la tension superficielle (TNR)

Énergies de liaison (courbe d'Aston) et tension superficielle (TNR)									
R _p	9,00451234E-16	m	F 1,06217660E-13			$\gamma = \frac{(E_L/A)F}{R_p} \frac{2(Z-2)}{6\sqrt{3}(Z-3)+8}$			
n°	Noyau atomique	Z	A	E _L / A	U	% / X	γ	U	% / X
1	Oxygène	8	16	7,976206	MeV/c ²	90,69%	2,09113118E+17	J/m ²	93,48%
2	Fluor	9	19	7,779015	MeV/c ²	88,45%	2,02787527E+17	J/m ²	90,65%
3	Néon	10	20	8,032240	MeV/c ²	91,33%	2,08502495E+17	J/m ²	93,21%
4	Sodium	11	23	8,111493	MeV/c ²	92,23%	2,09868884E+17	J/m ²	93,82%
5	Magnésium	12	24	8,260709	MeV/c ²	93,93%	2,13170001E+17	J/m ²	95,29%
6	Aluminium	13	27	8,331545	MeV/c ²	94,74%	2,14538396E+17	J/m ²	95,90%
7	Silicium	14	28	8,447744	MeV/c ²	96,06%	2,17143756E+17	J/m ²	97,07%
8	Phosphore	15	31	8,481178	MeV/c ²	96,44%	2,17675663E+17	J/m ²	97,31%
9	Soufre	16	32	8,493134	MeV/c ²	96,57%	2,17702201E+17	J/m ²	97,32%
10	Chlore	17	35	8,520278	MeV/c ²	96,88%	2,18154839E+17	J/m ²	97,52%
11	Argon	18	40	8,595259	MeV/c ²	97,73%	2,19860498E+17	J/m ²	98,28%
12	Potassium	19	39	8,557020	MeV/c ²	97,30%	2,18694584E+17	J/m ²	97,76%
13	Calcium	20	40	8,551301	MeV/c ²	97,23%	2,18381881E+17	J/m ²	97,62%
14	Scandium	21	45	8,618840	MeV/c ²	98,00%	2,19956712E+17	J/m ²	98,33%
15	Titane	22	48	8,722903	MeV/c ²	99,19%	2,22476020E+17	J/m ²	99,45%
16	Vanadium	23	51	8,742051	MeV/c ²	99,40%	2,22840827E+17	J/m ²	99,61%
17	Chrome	24	52	8,775944	MeV/c ²	99,79%	2,23592139E+17	J/m ²	99,95%
18	Manganèse	25	55	8,764988	MeV/c ²	99,66%	2,23210382E+17	J/m ²	99,78%
19	Fer	26	56	8,790923	MeV/c ²	99,96%	2,23776582E+17	J/m ²	100,03%
20	Cobalt	27	59	8,768013	MeV/c ²	99,70%	2,23106971E+17	J/m ²	99,73%
21	Nickel	28	58	8,732041	MeV/c ²	99,29%	2,22112250E+17	J/m ²	99,29%
X	Nickel 62	28	62	8,794549	MeV/c ²	100,00%	2,23702233E+17	J/m ²	100,00%
22	Cuivre	29	63	8,752134	MeV/c ²	99,52%	2,22549715E+17	J/m ²	99,48%
23	Zinc	30	64	8,735898	MeV/c ²	99,33%	2,22068664E+17	J/m ²	99,27%
24	Gallium	31	69	8,724578	MeV/c ²	99,20%	2,21717530E+17	J/m ²	99,11%
25	Germanium	32	74	8,725200	MeV/c ²	99,21%	2,21674213E+17	J/m ²	99,09%
26	Arsenic	33	75	8,682792	MeV/c ²	98,73%	2,20541775E+17	J/m ²	98,59%
27	Sélénium	34	80	8,710819	MeV/c ²	99,05%	2,21201942E+17	J/m ²	98,88%
28	Brome	35	79	8,786600	MeV/c ²	99,91%	2,23077338E+17	J/m ²	99,72%
29	Krypton	36	84	8,717350	MeV/c ²	99,12%	2,21273477E+17	J/m ²	98,91%

ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

Explications... (Voir détails en annexe 13)

1. **Ligne bleue à gauche** : Rappel du rayon de charge du proton R_p .
2. **Ligne bleue au milieu** : Coefficient F de conversion d'un mégaélectronvolt en joule : $1 \text{ MeV}/c^2 = 1,06217663 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.
3. **Ligne bleue à droite** : Équation de la *tension superficielle* γ d'un noyau atomique au niveau de la sphère de contact des protons et neutrons de coque, obtenue à partir de l'énergie de liaison par nucléon convertie en joules et du nombre de protons Z .
4. **Ligne verte x** : Une ligne supplémentaire est intercalée pour donner les caractéristiques du noyau atomique du **nickel 62**, réputé être celui qui possède la plus grande énergie de liaison par nucléon.
5. **Colonne 1 et 2** : Numérotation et nom des noyaux atomiques allant de celui de l'atome d'**oxygène 16** à celui de l'atome de **krypton 84**.
6. **Colonne 3** : Nombre de masse A des différents éléments.
7. **Colonne 4** : Nombre de protons Z des différents éléments.
8. **Colonne 5 et 6** : Énergies de liaison par nucléon exprimées en mégaélectronvolts (MeV/c^2). Source : <https://nds.iaea.org/masses/mass.mas03round>.
9. **Colonne 7** : Comparaisons exprimées en pourcentage de l'énergie de liaison par nucléon de chaque noyau atomique avec celle du noyau de l'atome de **nickel 62**.
10. **Colonne 8 et 9** : Calcul de la tension superficielle de chaque noyau atomique exprimée en joule/mètre carré (J/m^2), à partir de son énergie de liaison mesurée expérimentalement, selon l'équation :

$$\gamma = \frac{(E_l / A)F}{R_p^2} \frac{2(Z-2)}{6\sqrt{3}(Z-3) + 8} \quad (9.5)$$

L'énergie de liaison par nucléon convertie en joules est notée $(E_l/A) F$. Cette valeur est multipliée par le facteur $2 (Z-2)$ représentant le nombre de nucléons de coque présents en surface, en excluant donc les protons et neutrons de pointe, les neutrons de lest ou chaloupe. Le dénominateur de la formule donne la surface de la sphère de contact des protons et neutrons de coque à partir du rayon de charge du proton R_p , élevé au carré. Nous avons donc bien une énergie au numérateur et une surface au dénominateur, le rapport correspondant à une tension superficielle.

9. **Colonne 9** : Comparaisons exprimées en pourcentage de la *tension superficielle* de chaque noyau atomique avec celle du noyau de l'atome de **nickel 62**.

THÉORIE NR

Le Tableau 9.2 fait ainsi apparaître une échelle de tensions superficielles allant de $\gamma_o = 2,0911 \cdot 10^{17} \text{ J/m}^2$ pour le noyau de l'atome d'**oxygène 16** à $\gamma_f = 2,2377 \cdot 10^{17} \text{ J/m}^2$ pour celui de l'atome de **fer 56**. Notons que dans ce classement original de la théorie NR, le **fer 56** récupère le statut dont il dispose en terme d'*abondance naturelle des éléments chimiques dans l'Univers*, avec ce qui a été baptisé le *pic du fer*¹, détrônant ainsi le **nickel 62**, détenteur lui du record de la plus grande *énergie de liaison par nucléon*. Mais quelle est la signification physique de cet ordre de grandeur de 10^{17} J/m^2 , associé à la notion de *tension superficielle* des noyaux atomiques. Rappelons quelques notions d'*équations aux dimensions*, dans le *Système international d'unités* (SI) et dans celui simplifié de la théorie NR :

Tab. 9.3 : *Équations aux dimensions de différentes grandeurs des noyaux atomiques*

Grandeur	Système	Équation	Système	Équation
Énergie (Joule)	SI (J)	$\mathbf{M L^2 T^{-2}}$	TNR (J)	$\mathbf{L^3 T^{-3}}$
Force (Newton)	SI (N)	$\mathbf{M L T^{-2}}$	TNR (N)	$\mathbf{L^2 T^{-3}}$
Tension superficielle(Joule/m ²)	SI (γ)	$\mathbf{M T^{-2}}$	TNR (γ)	$\mathbf{L T^{-3}}$
Pression (Pascal)	SI (P)	$\mathbf{M L^{-1} T^{-2}}$	TNR (P)	$\mathbf{T^{-3}}$

La *tension superficielle* peut donc s'exprimer soit comme une *énergie divisée par une surface*, soit comme une *force divisée par une longueur*, voire une *pression multipliée par une longueur*. Observons que les trois premières grandeurs s'expriment dans le système d'unités simplifié (TNR) comme une *pression* multipliée respectivement par un *volume*, une *surface* et une *longueur*. Nous pouvons comparer cet ordre de grandeur de 10^{17} J/m^2 de la tension superficielle en surface des noyaux atomiques avec celle qui règne au niveau externe d'un proton, tel qu'il est décrit par son tracé régulateur. La longueur à prendre en compte est alors le rayon de charge du proton R_p divisé par $\sqrt{3}$, afin de se situer au niveau de la sphère de contact, puisque telle est la logique de la théorie NR (voir Tome 1 page 234 - Tab. 8.1 : *Divers calculs avec la force de Casimir généralisée (FCG)*).

La valeur de ce rayon est $5,19875762 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ et il nous suffit donc de diviser la *force de Casimir généralisée* (FCG) en surface d'un proton $F_p = 6,26767869 \cdot 10^4 \text{ N}$ par ce rayon pour trouver la tension superficielle $\gamma_p = 1,20561087 \cdot 10^{20} \text{ J/m}^2$, ce qui nous donne ces rapports :

$$\gamma_p / \gamma_o = 576,54 \quad \text{et} \quad \gamma_p / \gamma_f = 538,77$$

1 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Pic_du_fer