

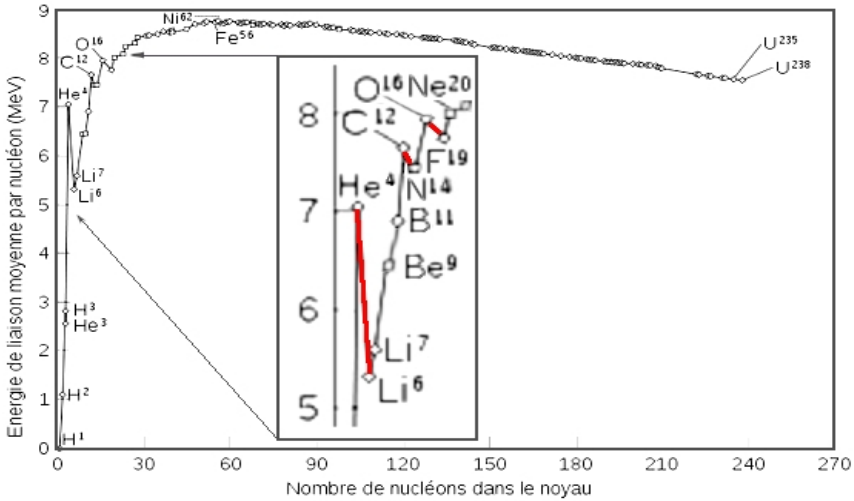
ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

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. 9.33 : Énergies de liaison par nucléon des noyaux atomiques

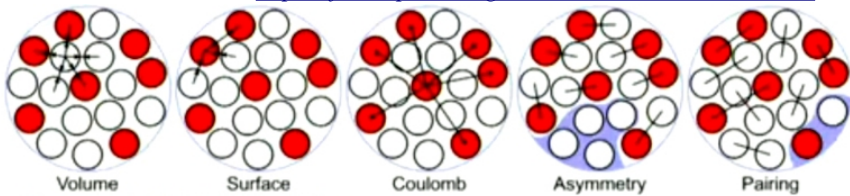
Source : WIKIPÉDIA: https://fr.wikipedia.org/wiki/Courbe_d'Aston



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. 9.34 : Formule de Bethe-Weizsäcker

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



Formule de Bethe-Weizsäcker :

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

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 26 *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'*appairer* 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 sont *a priori* rigoureusement égaux, et pairs en raison du principe de maillage. En dehors de la surface d'un noyau atomique, 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 *défaut 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 : $\mathbf{M L T^{-2}}$ (SI) soit $\mathbf{L^2 T^{-3}}$ (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 à celle de *tension superficielle* en divisant cette énergie par une longueur. Reste à choisir cette longueur. Le tableau suivant exploite cette idée :

Tab. 9.4 : Énergies de liaison (Aston) et de la tension superficielle (TNR)

Énergies de liaison (courbe d'Aston) et tension superficielle (TNR)								
Rayon d'un nucléon $r = 9,00451234 \cdot 10^{-16}$ m			Rayon du noyau atomique $R = r \sqrt{\frac{3 \sqrt{3}}{8 \pi} (N_p - 2)}$					
n°	Noyau atomique	Z	Rayon du noyau	R / R _x	El. / A	Tension superficielle γ	γ_x / γ	Δ %
1	Oxygène	8	1,00289816E-15	0,480	7,976206	1,11344191E+17	0,489	101,89 %
2	Fluor	9	1,08325382E-15	0,519	7,779015	1,14898501E+17	0,505	97,34 %
3	Néon	10	1,15804704E-15	0,555	8,032240	1,24848400E+17	0,549	98,94 %
4	Sodium	11	1,22829438E-15	0,588	8,111493	1,32077345E+17	0,581	98,69 %
5	Magnésium	12	1,29473596E-15	0,620	8,260709	1,40364989E+17	0,617	99,50 %
6	Aluminium	13	1,35793053E-15	0,650	8,331545	1,47251333E+17	0,647	99,52 %
7	Silicium	14	1,41831218E-15	0,679	8,447744	1,54861072E+17	0,681	100,21 %
8	Phosphore	15	1,47622612E-15	0,707	8,481178	1,60864912E+17	0,707	100,01 %
9	Soufre	16	1,53195224E-15	0,734	8,493134	1,66319819E+17	0,731	99,64 %
10	Chlore	17	1,58572122E-15	0,760	8,520278	1,71939993E+17	0,756	99,51 %
11	Argon	18	1,63772584E-15	0,784	8,595259	1,78441837E+17	0,784	100,00 %
12	Potassium	19	1,68812915E-15	0,809	8,557020	1,82481725E+17	0,802	99,21 %
13	Calcium	20	1,73707057E-15	0,832	8,551301	1,87067494E+17	0,822	98,83 %
14	Scandium	21	1,78467035E-15	0,855	8,618840	1,93174946E+17	0,849	99,34 %
15	Titane	22	1,83103315E-15	0,877	8,722903	2,00084814E+17	0,880	100,29 %
16	Vanadium	23	1,87625065E-15	0,899	8,742051	2,05010052E+17	0,901	100,28 %
17	Chrome	24	1,92040377E-15	0,920	8,775944	2,10212785E+17	0,924	100,46 %
18	Manganèse	25	1,96356430E-15	0,941	8,764988	2,14263126E+17	0,942	100,15 %
19	Fer	26	2,00579632E-15	0,961	8,790923	2,19137978E+17	0,963	100,27 %
20	Cobalt	27	2,04715729E-15	0,981	8,768013	2,22716973E+17	0,979	99,85 %
21	Nickel	28	2,08769900E-15	1,000	8,732041	2,25861206E+17	0,993	99,29 %
X	Nickel 62	28	2,08769900E-15	R _x / R	8,794549	2,27478026E+17	γ / γ_x	100,00 %
22	Cuivre	29	2,12746827E-15	0,981	8,752134	2,30376881E+17	0,987	100,62 %
23	Zinc	30	2,16650764E-15	0,964	8,735898	2,33870435E+17	0,973	100,94 %
24	Gallium	31	2,20485588E-15	0,947	8,724578	2,37419001E+17	0,958	101,19 %
25	Germanium	32	2,24254846E-15	0,931	8,725200	2,41226627E+17	0,943	101,30 %
26	Arsenic	33	2,27961789E-15	0,916	8,682792	2,43768349E+17	0,933	101,90 %
27	Sélénium	34	2,31609409E-15	0,901	8,710819	2,48225690E+17	0,916	101,67 %
28	Brome	35	2,35200466E-15	0,888	8,786600	2,54033850E+17	0,895	100,88 %
29	Krypton	36	2,38737514E-15	0,874	8,717350	2,55600592E+17	0,890	101,77 %

Explications...

ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

1. **Ligne bleue** : Rappel de la procédure qui a été employée dans le tableau 9.1 de la page 16 visant le *calcul des angles de liaison dans les noyaux atomiques*.
2. **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.
3. **Colonne 1 et 2** : Numérotation et nom des noyaux atomiques allant de celui de l'atome d'oxygène à celui de l'atome de krypton.
4. **Colonne 3** : Nombre **Z** de protons présents dans chaque noyau atomique.
5. **Colonne 4** : Rayon des noyaux atomiques calculés à partir de l'équation 9.1 rappelée à droite de la ligne bleue.
6. **Colonne 5** : Les rayons des différents noyaux atomiques sont comparés avec celui du nickel 62, en établissant deux évolutions dégressives, ce qui oblige à inverser le rapport entre rayon de référence **R_x** et rayon particulier **R**.
7. **Colonne 6** : Énergies de liaison par nucléon exprimées en méga-électronvolts (**MeV/c²**). Source : <https://nds.iaea.org/masses/mass.mas03round>.
8. **Colonne 7** : Calcul de la tension superficielle de chaque noyau atomique à partir de son énergie de liaison mesurée expérimentalement, selon l'équation suivante :

$$\gamma = (E_L / A) \frac{2(Z-1)}{R} \quad (9.5)$$

L'énergie de liaison par nucléon est notée **E_L/A**. Cette valeur est multipliée par le facteur **2 (Z-1)** représentant le nombre de nucléons de coque présents en surface, à l'exclusion des protons et neutrons de pointe, des neutrons de lest ou chaloupe. Le rayon choisi pour passer de l'énergie de liaison par nucléon à la tension superficielle **γ** est précisément celui du noyau atomique considéré.

9. **Colonne 8** : Même procédure de comparaison que celle utilisée pour les rayons des noyaux atomiques.
10. **Colonne 9** : Visualisation des écarts en pourcentage entre l'évolution des rayons des noyaux atomique et celle de la tension superficielle. Les fluctuations par rapport aux variations des rayons des noyaux atomiques se cantonne dans une marge de **±2 %**.