

New energy functional for heavy nuclei / Nouvelle fonctionnelle de la densité d'énergie pour les noyaux lourds

Michael Bender

Institut de Physique des 2 Infinis de Lyon
CNRS/IN2P3 & Université de Lyon & Université Lyon 1
F-69622 Villeurbanne, France

AG de l'IP2i

Villeurbanne, 7 Novembre 2019



Participants

- Michael Bender (DR2 CNRS)
- Karim Bennaceur (MC UCBL1)
- Dany Davesne (Pr UCBL1)
- N. N. (postdoc)

Participants

- Michael Bender (DR2 CNRS)
- Karim Bennaceur (MC UCBL1)
- Dany Davesne (Pr UCBL1)
- N. N. (postdoc)

en collaboration avec (sur leurs fonds propres)

- Jacek Dobaczewski (Pr, York)
- Alessandro Pastore (Lect, York)
- Wouter Ryssens (postdoc, Yale)

Participants

- Michael Bender (DR2 CNRS)
- Karim Bennaceur (MC UCBL1)
- Dany Davesne (Pr UCBL1)
- N. N. (postdoc)

en collaboration avec (sur leurs fonds propres)

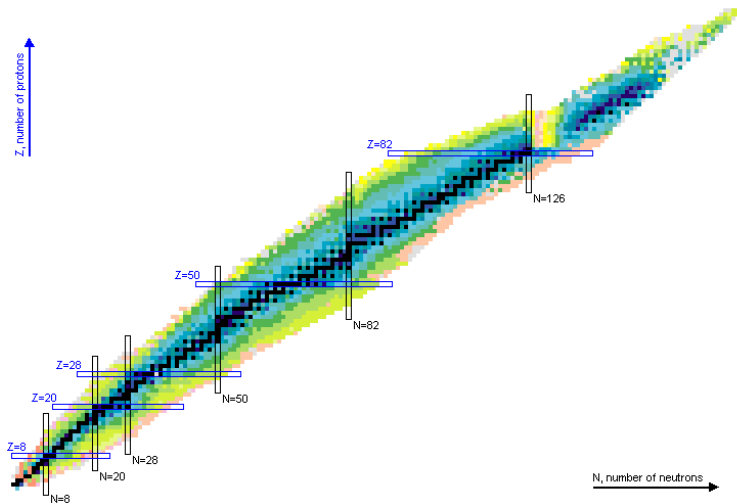
- Jacek Dobaczewski (Pr, York)
- Alessandro Pastore (Lect, York)
- Wouter Ryssens (postdoc, Yale)

A la recherche du temps perdu:

- AAPG 2008 "SQUASE" – Spectroscopic quality Skyrme energy density functional (CENBG + IPNL + CEA Saclay) pas accepté
- AAPG 2009 "NESQ" – Nuclear Energy density functional of Spectroscopic Quality / Fonctionnelle de la densité d'énergie pour la spectroscopie nucléaire (CENBG + IPNL + CEA Saclay) pas accepté
- AAPG 2010 "NESQ" – Nuclear Energy density functional of Spectroscopic Quality / Fonctionnelle de la densité d'énergie pour la spectroscopie nucléaire (CENBG + IPNL + CEA Saclay) **accepté!**
- AAPG 2017 "SHEET" – SuperHeavy Elements - Experiment and Theory / Éléments superlourds - expérience et théorie (IPNL + GANIL + CEA Saclay) pas accepté
- AAPG 2018 "NEWFUN" – New energy functional for heavy nuclei / Nouvelle fonctionnelle de la densité d'énergie pour les noyaux lourds (IP2I) **accepté!**

Où trouve-t-on des noyaux super-lourds?

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>

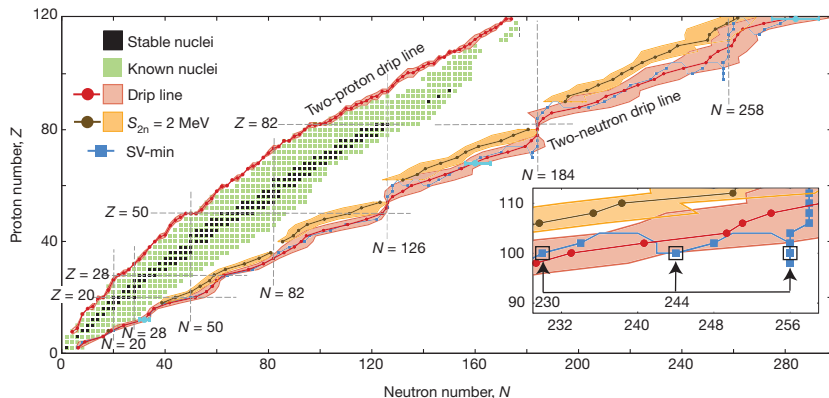


- isotope: même Z , N différent
- isotone: même N , Z différent

- isobar: même $A = N + Z$, $T_3 = N - Z$ différent
- isodiaphers: même $T_3 = N - Z$, A différent

Où trouve-t-on des noyaux super-lourds?

Erlar et al, Nature 486 (2012) 509

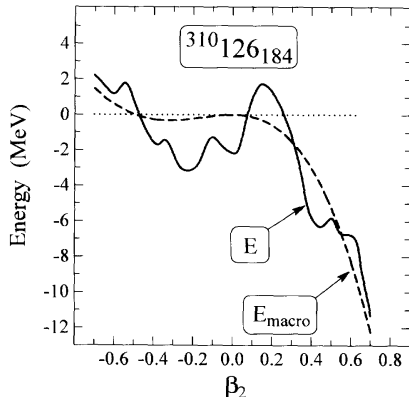
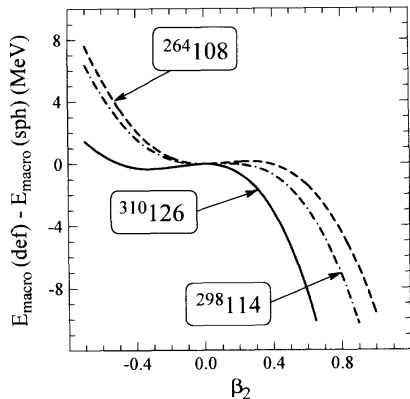


- isotope: même Z , N différent
- isotone: même N , Z différent

- isobar: même $A = N + Z$, $T_3 = N - Z$ différent
- isodiaphers: même $T_3 = N - Z$, A différent

C'est quoi, un noyau super-lourd?

Ćwiok et al, NPA 611 (1996) 211



- compétition entre tension de surface et répulsion Coulombienne. Coulomb gagne pour $Z \simeq 100$
- stabilisation par des "effets de couches"
- îlot de stabilité?

Ce sont aussi les plus lourds éléments chimiques

https://iupac.org/wp-content/uploads/2018/12/IUPAC_Periodic_Table-01Dec18.jpg

1																	18	
1 H hydrogen 1.008 (1.0078, 1.0082)																	2 He helium 4.0026	
3 Li lithium 6.941 (6.939, 6.967)	4 Be beryllium 9.0122																	10 Ne neon 20.180
11 Na sodium 22.990	12 Mg magnesium 24.304 (24.304, 24.307)																	18 Ar argon 39.948 (39.942, 39.963)
19 K potassium 39.098	20 Ca calcium 40.078(4)	21 Sc scandium 44.956	22 Ti titanium 47.867	23 V vanadium 50.942	24 Cr chromium 51.996	25 Mn manganese 54.938 (54.938, 54.942)	26 Fe iron 55.845(2)	27 Co cobalt 58.933	28 Ni nickel 58.693	29 Cu copper 63.546(3)	30 Zn zinc 65.38(2)	31 Ga gallium 69.723	32 Ge germanium 72.630(8)	33 As arsenic 74.9216(5)	34 Se selenium 78.9718(8)	35 Br bromine 79.904(1)	36 Kr krypton 83.796(2)	
37 Rb rubidium 85.468	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.906	40 Zr zirconium 91.224(2)	41 Nb niobium 92.906	42 Mo molybdenum 95.95	43 Tc technetium	44 Ru ruthenium 101.07(2)	45 Rh rhodium 102.91	46 Pd palladium 106.42	47 Ag silver 107.87	48 Cd cadmium 112.41	49 In indium 114.82	50 Sn tin 118.71	51 Sb antimony 121.76	52 Te tellurium 127.60(3)	53 I iodine 126.90	54 Xe xenon 131.29	
55 Cs caesium 132.91	56 Ba barium 137.33	57-71 Lanthanoids	72 Hf hafnium 178.49(2)	73 Ta tantalum 180.95	74 W tungsten 183.84	75 Re rhenium 186.21	76 Os osmium 190.23(2)	77 Ir iridium 192.22	78 Pt platinum 195.08	79 Au gold 196.97	80 Hg mercury 200.59	81 Tl thallium 204.38 (204.38, 204.38)	82 Pb lead 207.2	83 Bi bismuth 208.98	84 Po polonium	85 At astatine	86 Rn radon	
87 Fr francium	88 Ra radium	89-103 actinoids	104 Rf rutherfordium	105 Db dubnium	106 Sg seaborgium	107 Bh bohrium	108 Hs hassium	109 Mt meitnerium	110 Ds darmstadtium	111 Rg roentgenium	112 Cn copernicium	113 Nh nihonium	114 Fl flerovium	115 Mc moscovium	116 Lv livermorium	117 Ts tennessine	118 Og oganeson	

Key:
atomic number
Symbol
name
isotopic atomic weight
standard atomic weight



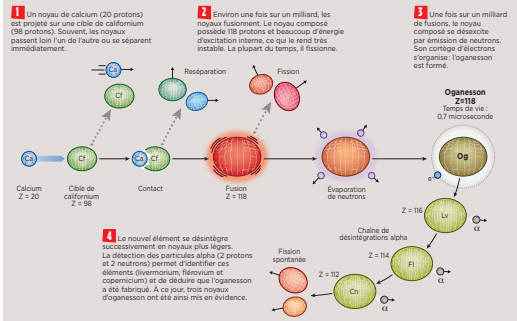
57 La lanthanum 138.91	58 Ce cerium 140.12	59 Pr praseodymium 140.91	60 Nd neodymium 144.24	61 Pm promethium	62 Sm samarium 150.36(2)	63 Eu europium 151.96	64 Gd gadolinium 157.25(3)	65 Tb terbium 158.93	66 Dy dysprosium 162.50	67 Ho holmium 164.93	68 Er erbium 167.26	69 Tm thulium 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu lutetium 174.97
89 Ac actinium 227.03	90 Th thorium 232.04	91 Pa protactinium 231.04	92 U uranium 238.03	93 Np neptunium	94 Pu plutonium	95 Am americium	96 Cm curium	97 Bk berkelium	98 Cf californium	99 Es einsteinium	100 Fm fermium	101 Md mendelevium	102 No nobelium	103 Lr lawrencium

For notes and updates to this table, see www.iupac.org. This version is dated 1 December 2018.
Copyright © 2018 IUPAC, the International Union of Pure and Applied Chemistry.

Que savons nous des noyaux super-lourds?

A. Drouart & M. Bender, La Recherche mensuel No 524 daté juin 2017, pages 44-50

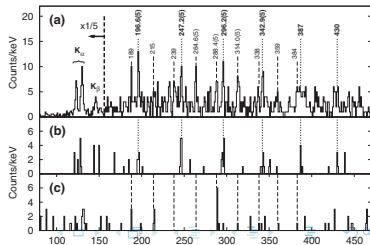
Fig. 1 Synthèse de l'oganesson : un défi expérimental



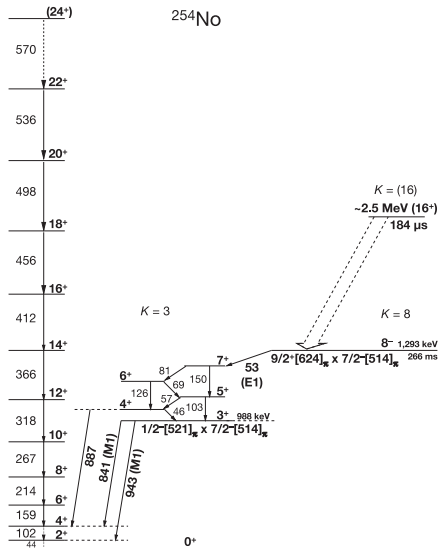
- taux de production très petits

- spectroscopie prompt (rayons γ , e^- de conversion, rayons X)
- spectroscopie de décroissance après implantation (rayons α , β , γ , fission)
- spectroscopie laser (distribution de charge et de magnétisation dans le noyau sondé par les e^- atomiques)
- mesures de masse

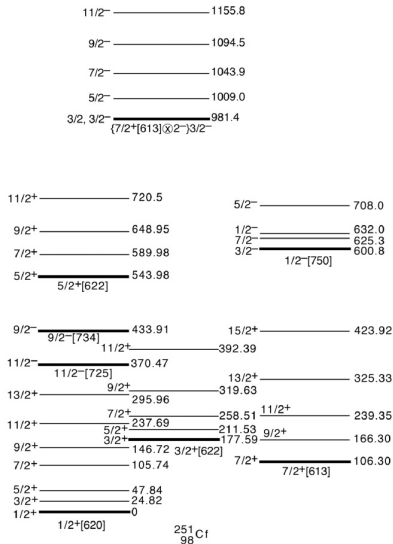
Ketelhut et al, PRL 102 (2009) 212501



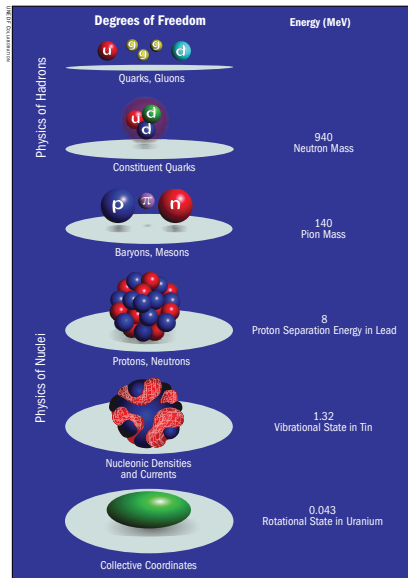
Herzberg et al, Nature 442 (2006) 05069



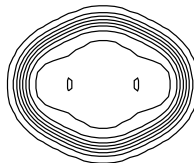
Ahmad et al, PRC72 (2005) 054308



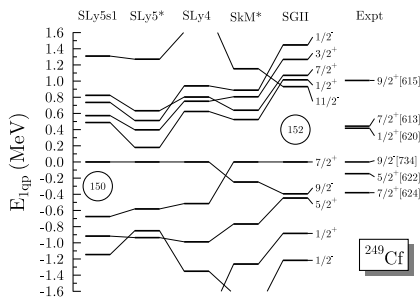
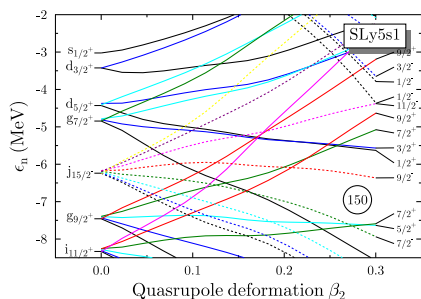
Où commencer si on veut modeliser des noyaux (lourds)?



- hierarchie des phénomènes émergents à plusieurs niveaux
- "degrés de liberté" utiles pour décrire des phénomènes à basse énergie d'excitation
 - occupations des niveaux dans les spectres des particules à un corps
 - densités à une particule des neutrons et protons
 - "déformation"
 - ...



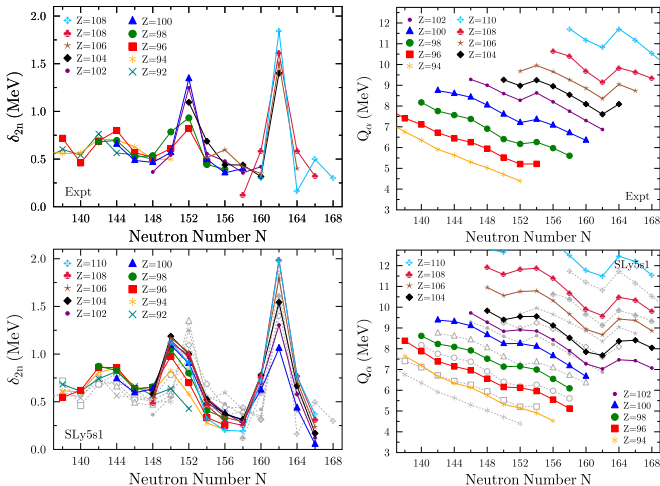
distribution de densité (calculé) du ^{240}Pu dans son référentiel intrinsèque



Bender et al, to be published

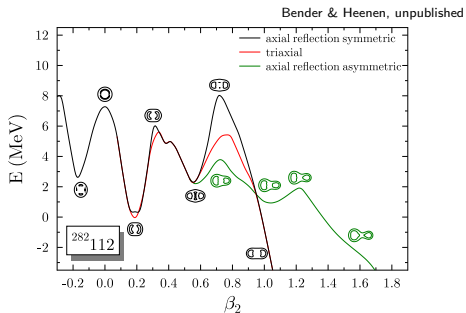
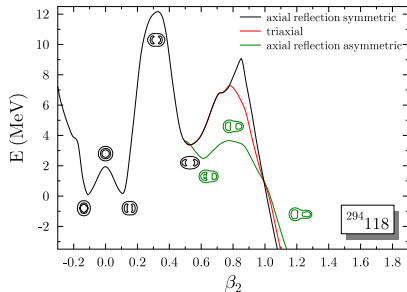
- gauche: énergies des particules individuels dans le modèle (qui sont non-observable)
- droite: énergies de séparation de neutron le système à N corps et le système à $N - 1$ corps (multiplié avec -1 pour au cas de séparation d'un neutron occupé)

Bender et al, to be published

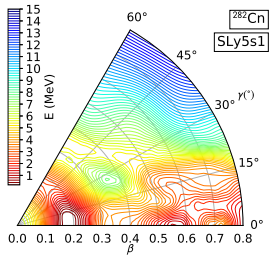
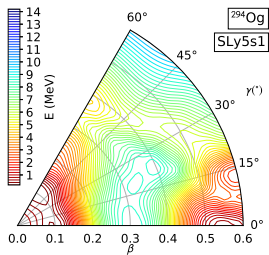
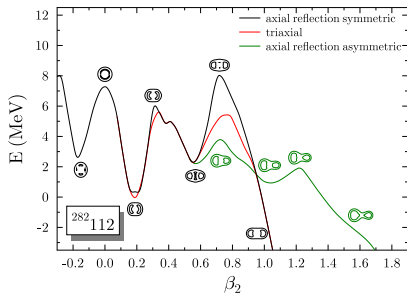
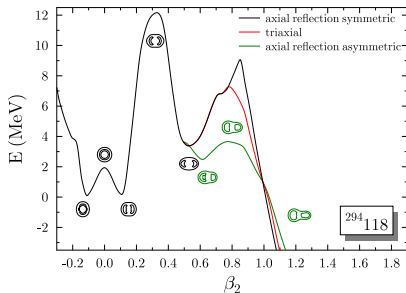


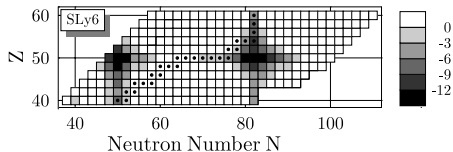
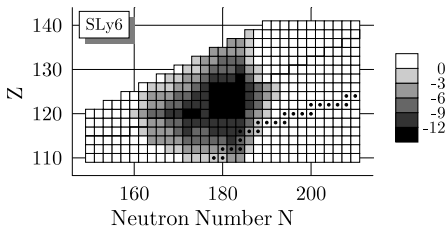
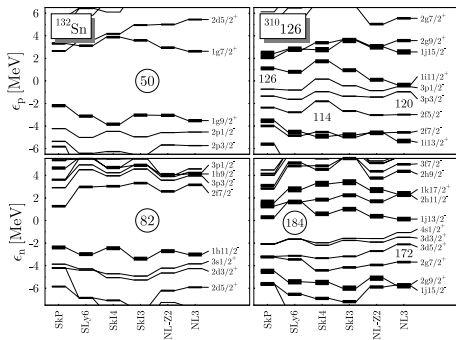
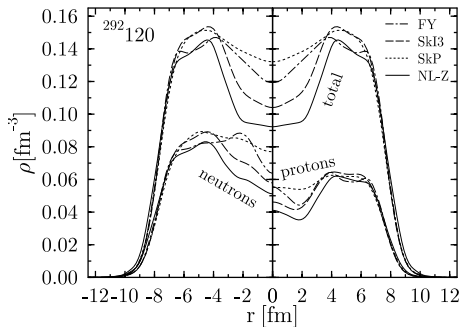
$$\delta_{2n}(N, Z) \equiv E(Z, N - 2) - 2E(N, Z) + E(Z, N + 2)$$

$$Q_\alpha(N, Z) \equiv E(Z, N) - E(Z - 2, N - 2) - E(2, 2)$$



Bender & Heenen, unpublished





Bender & Heenen, J. Phys. Conf. Ser. 420 (2013) 012002

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{kin}} + \mathcal{E}_{\text{Skyrme}} + \mathcal{E}_{\text{Coul}} + \mathcal{E}_{\text{pair}} + \mathcal{E}_{\text{corr}}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{Skyrme}} = \int d^3r \sum_{t=0,1} \sum_{t_3=-t}^{+t} \left\{ & C_t^{\rho\rho} [\rho_0] \rho_{tt_3} \rho_{t-t_3} + C_t^{\rho\tau} (\rho_{tt_3} \tau_{t-t_3} - \mathbf{j}_{tt_3} \cdot \mathbf{j}_{t-t_3}) \right. \\ & + C_t^{\rho\Delta\rho} \rho_{tt_3} \Delta\rho_{t-t_3} + C_t^{ss} [\rho_0] \mathbf{s}_{tt_3} \cdot \mathbf{s}_{t-t_3} + C_t^{s\Delta s} \mathbf{s}_{tt_3} \cdot \Delta\mathbf{s}_{t-t_3} \\ & + C_t^{sT} \left(\mathbf{s}_{tt_3} \cdot \mathbf{T}_{t-t_3} - \sum_{\mu,\nu=x,y,z} \mathbf{J}_{\mu\nu;tt_3} \mathbf{J}_{\nu\mu;t-t_3} \right) \\ & + C_t^{\rho\nabla J} (\rho_{tt_3} \nabla \cdot \mathbf{J}_{t-t_3} + \mathbf{s}_{tt_3} \cdot \nabla \times \mathbf{j}_{t-t_3}) \\ & + C_t^{sF} \left(\mathbf{s}_{tt_3} \cdot \mathbf{F}_{t-t_3} - \frac{1}{2} \sum_{\mu,\nu=x,y,z} \mathbf{J}_{\mu\nu;tt_3} \mathbf{J}_{\nu\mu;t-t_3} - \frac{1}{2} \sum_{\mu,\nu=x,y,z} \mathbf{J}_{\mu\mu;tt_3} \mathbf{J}_{\nu\nu;t-t_3} \right) \\ & \left. + C_t^{\nabla s \nabla s} (\nabla \cdot \mathbf{s}_{tt_3}) (\nabla \cdot \mathbf{s}_{t-t_3}) \right\} \end{aligned}$$

Merci de votre attention.