



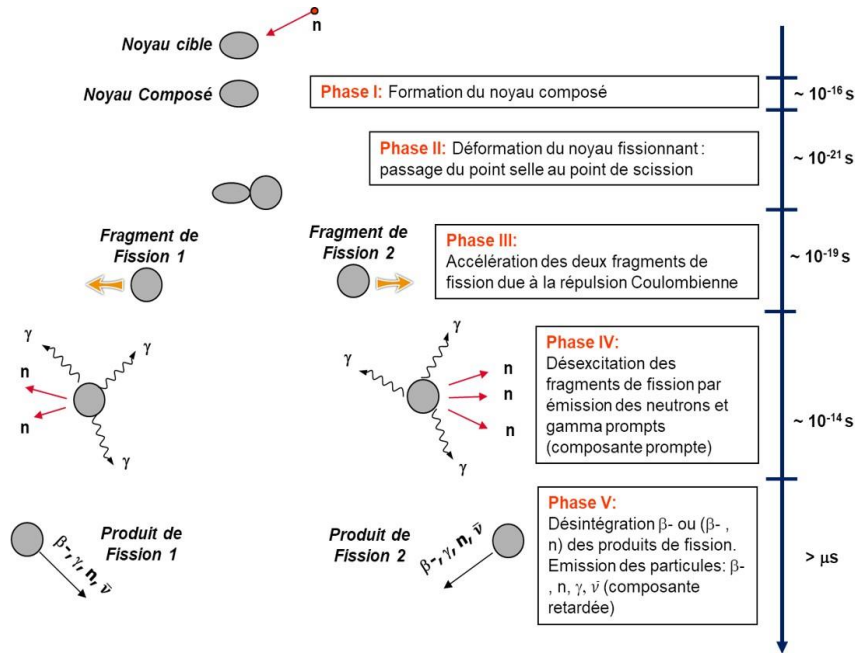
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# Données de structure pour les neutrons retardés

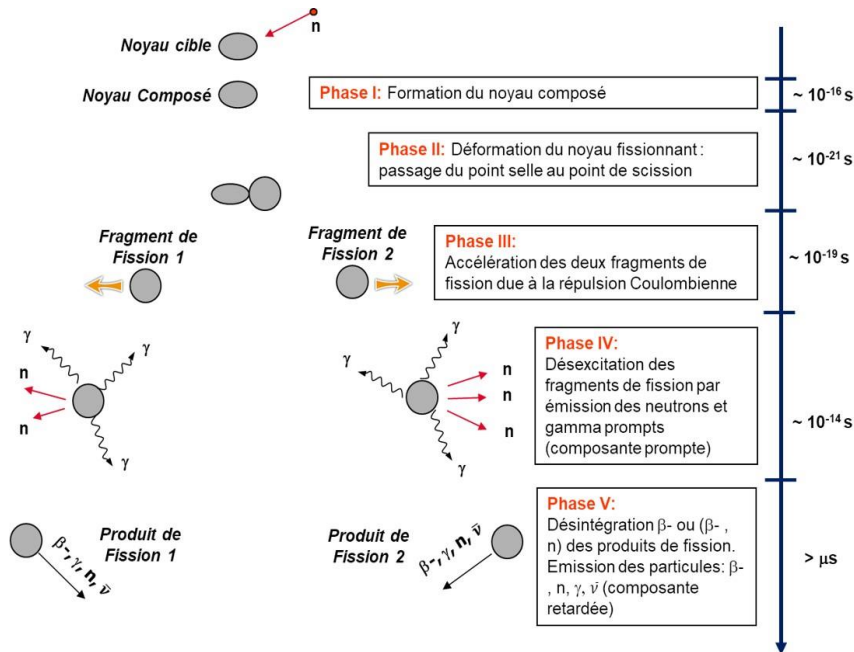
P. Leconte, O. Serot

CEA-Cadarache  
DES/IRENE/DER/SPRC/LEPh

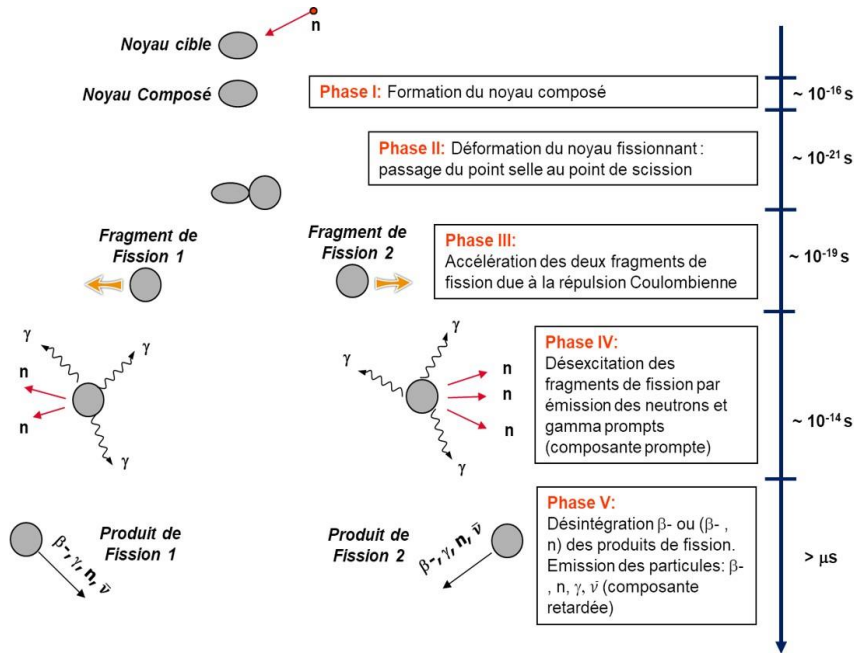
**Workshop Structure 27-28 Juin 2022**



□ 1939: découverte de la décroissance ( $\beta$ -, $n$ ) (R.B. Roberts, et al., Phys. Rev. **55**, 664 (1939))



- ❑ 1939: découverte de la décroissance ( $\beta$ -n) (R.B. Roberts, et al., Phys. Rev. **55**, 664 (1939))
- ❑ Neutrons retardés émis plusieurs secondes voire minutes après la fission
- ❑ Crucial pour le pilotage et la sûreté des réacteurs nucléaires, mais aussi en astrophysique ( $r$ -process calculations)



❑ 1939: découverte de la décroissance ( $\beta$ -n) (R.B. Roberts, et al., Phys. Rev. **55**, 664 (1939))

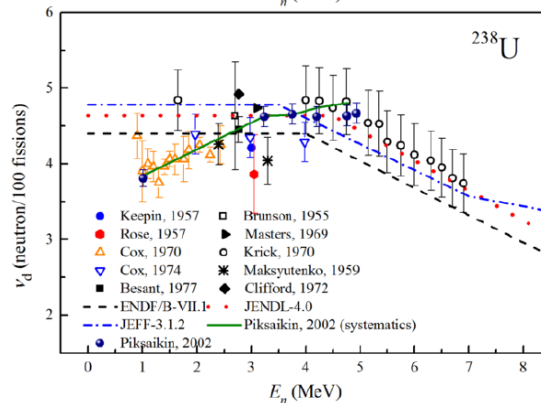
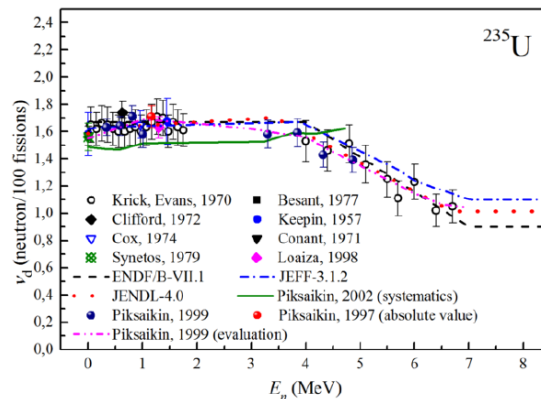
❑ Neutrons retardés émis plusieurs secondes voire minutes après la fission

❑ Crucial pour le pilotage et la sûreté des réacteurs nucléaires, mais aussi en astrophysique (*r*-process calculations)

❑ PF émetteurs de neutrons retardés = **précurseurs**

□ Pour satisfaire les besoins de la physique des réacteurs, on a besoin de connaître:

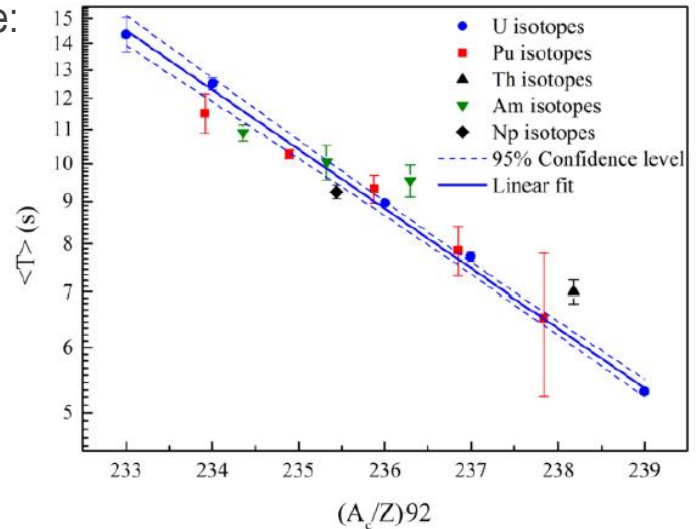
- ✓ Leur multiplicité moyenne en fonction de l'énergie du neutron incident :  $\langle v_d \rangle(E_n)$



From: P. Dimitriou et al., Nuclear Data Sheets 173 (2021) 144–238

□ Pour satisfaire les besoins de la physique des réacteurs, on a besoin de connaître:

- ✓ Leur multiplicité moyenne en fonction de l'énergie du neutron incident :  $\langle \nu_d \rangle (En)$
- ✓ L'évolution de  $\nu_d$  au cours du temps (période)

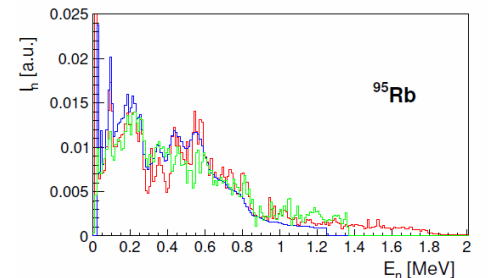
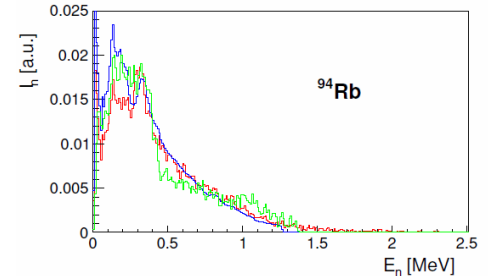
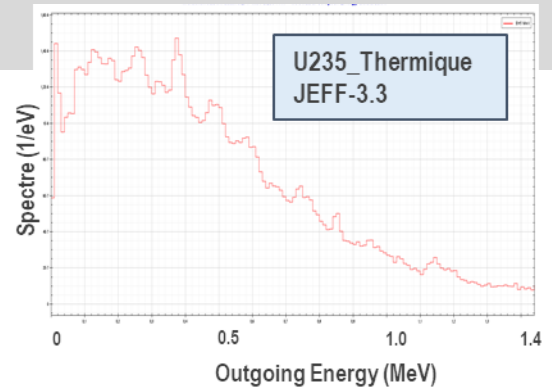


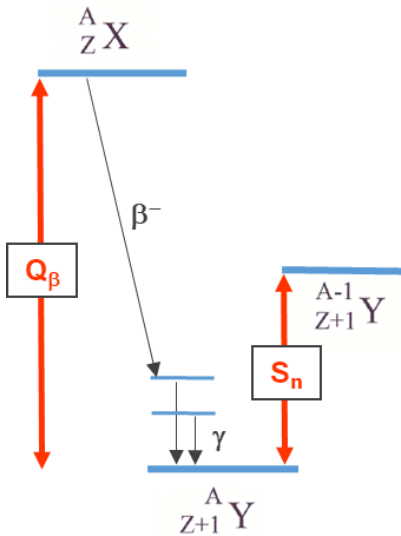
Systématique:

$$\langle T_{1/2} \rangle = \exp \left( a + b \left( \frac{A_{CN}}{Z_{CN}} \right) 92 \right)$$

From: P. Dimitriou et al., Nuclear Data Sheets 173 (2021) 144–238

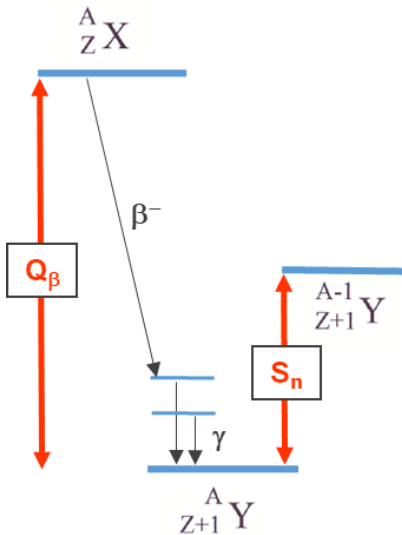
- ❑ Pour satisfaire les besoins de la physique des réacteurs, on a besoin de connaître:
  - ✓ Leur multiplicité moyenne en fonction de l'énergie du neutron incident :  $\langle \nu_d \rangle(E_n)$
  - ✓ L'évolution de  $\nu_d$  au cours du temps (période)
  - ✓ Le spectre en énergie des neutrons retardés



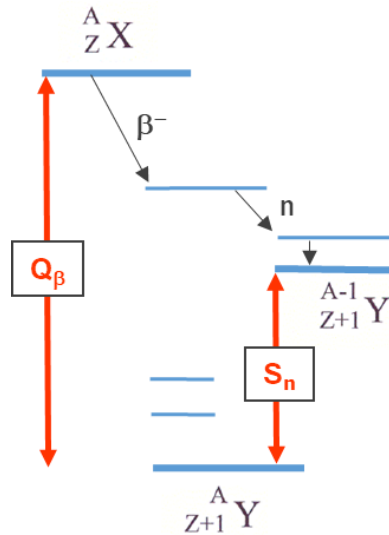


Transition  $\beta^-$ - sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron= $N_{\beta^-}$





Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron =  $N_{\beta^-}$



Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron =  $N_{\beta-1n}$

□  $N_n^i$  : nombre moyen de  
neutrons retardés émis  
par le précurseur  $i$

$$N_n = 1 \times P_{1n} + 2 \times P_{2n} + \dots$$

où  $P_{xn}$  représentent les  
probabilités d'émission de  $x$   
neutrons retardés

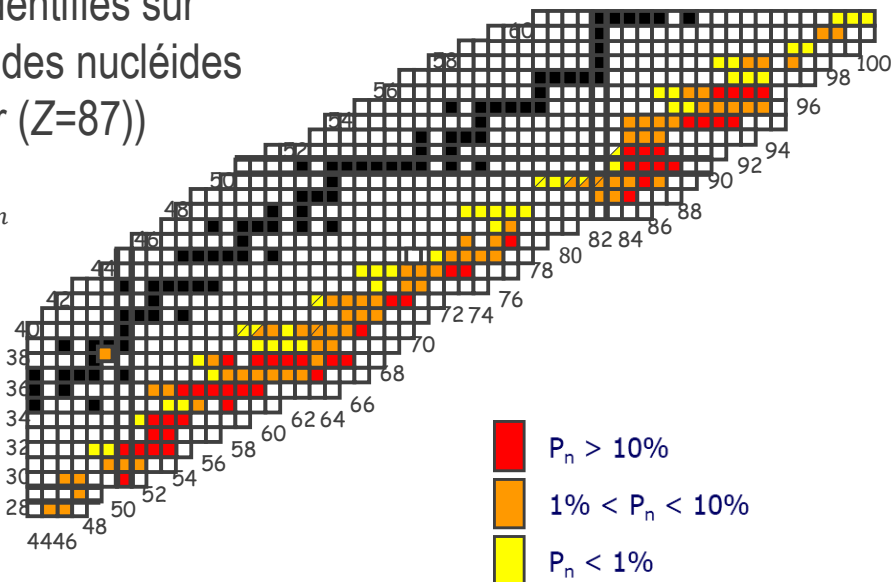
$$P_{1n} = \frac{N_{1n}}{N_{\beta^-}}$$

Approche microscopique compliquée compte tenu du nombre de précurseurs !

❑ Il y a 653 précurseurs identifiés sur l'ensemble de la charte des nucléides (entre  ${}^8\text{He}$  ( $Z=2$ ) et  ${}^{233}\text{Fr}$  ( $Z=87$ ))

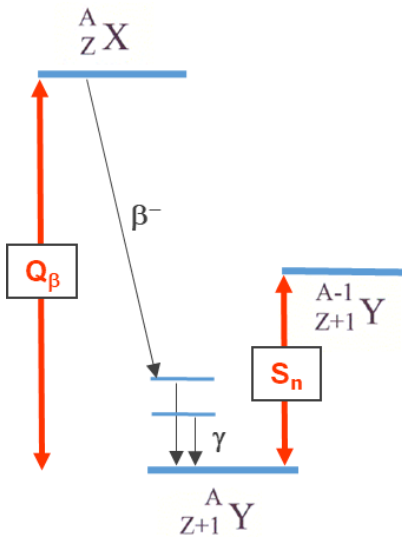
- 306 ont une valeur mesurée de  $P_{1n}$
- 32 ont une valeur mesurée de  $P_{2n}$
- 4 ont une valeur mesurée de  $P_{3n}$
- 1 ont une valeur mesurée de  $P_{4n}$

❑ Environ 300 précurseurs impliqués pour la physique des réacteurs....

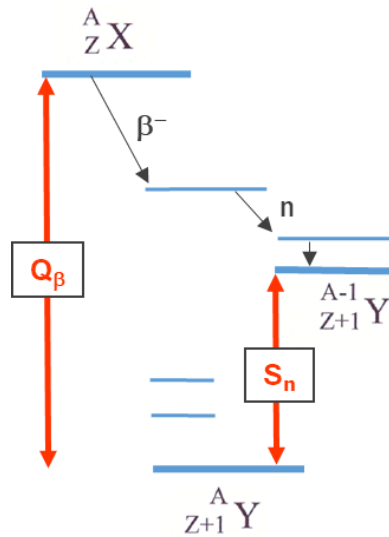


L. Mathieu, O. Serot, T. Materna, et al., JINST 7 P08029 (2012)

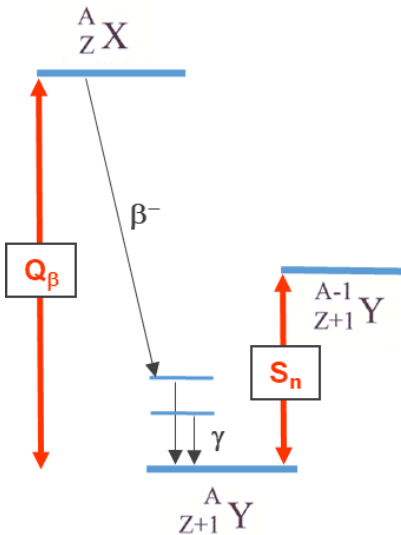
$$v_d = \sum_i N_n^i Y_{cum}^i$$



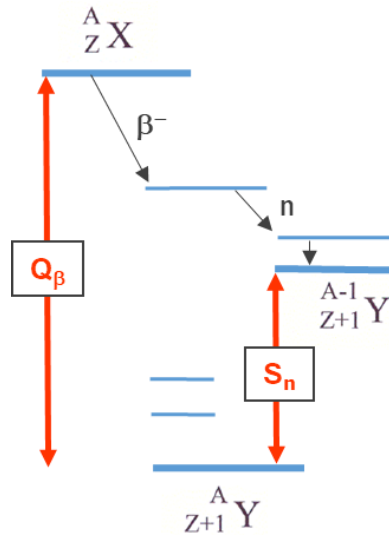
Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron =  $N_{\beta^-}$



Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron =  $N_{\beta-1n}$



Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron =  $N_{\beta^-}$



Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron =  $N_{\beta-1n}$

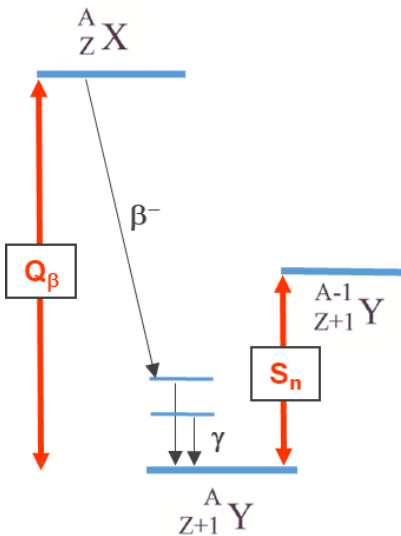
$$v_d = \sum_i N_n^i Y_{cum}^i$$

□  $N_n^i$  : nombre moyen de  
neutrons retardés émis  
par le précurseur  $i$

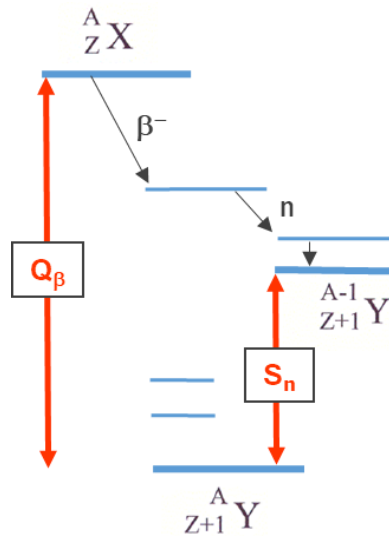
$$\Rightarrow N_n = 1 \times P_{1n} + 2 \times P_{2n} + \dots$$

où  $P_{xn}$  représentent les  
probabilités d'émission de  $x$   
neutrons retardés

$$P_{1n} = \frac{N_{1n}}{N_{\beta^-}}$$



Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron =  $N_{\beta^-}$



Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron =  $N_{\beta-1n}$

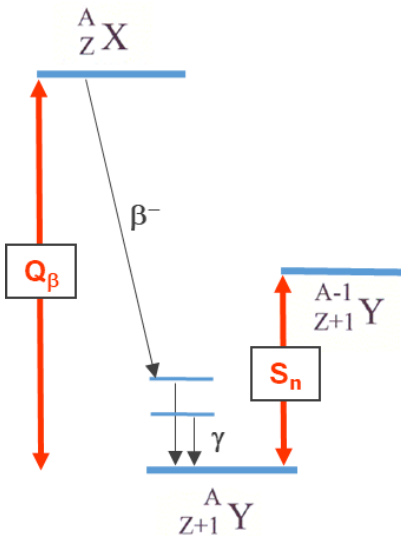
$$v_d = \sum_i N_n^i Y_{cum}^i$$

□  $N_n^i$  : nombre moyen de  
neutrons retardés émis  
par le précurseur  $i$

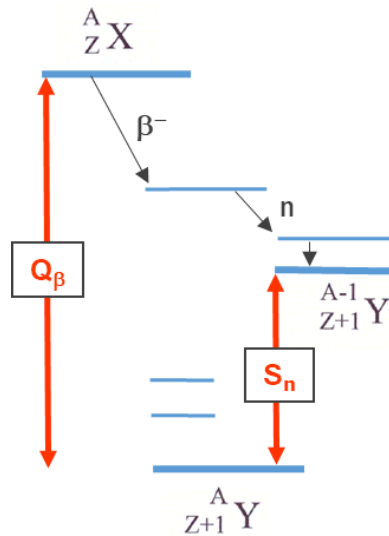
$$\Rightarrow N_n = 1 \times P_{1n} + 2 \times P_{2n} + \dots$$

où  $P_{xn}$  représentent les  
probabilités d'émission de  $x$   
neutrons retardés

$$P_{1n} = \frac{N_{1n}}{N_{\beta^-}}$$



Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron= $N_{\beta^-}$ .



Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron= $N_{\beta-1n}$

$$v_d = \sum_i N_n^i Y_{cum}^i$$

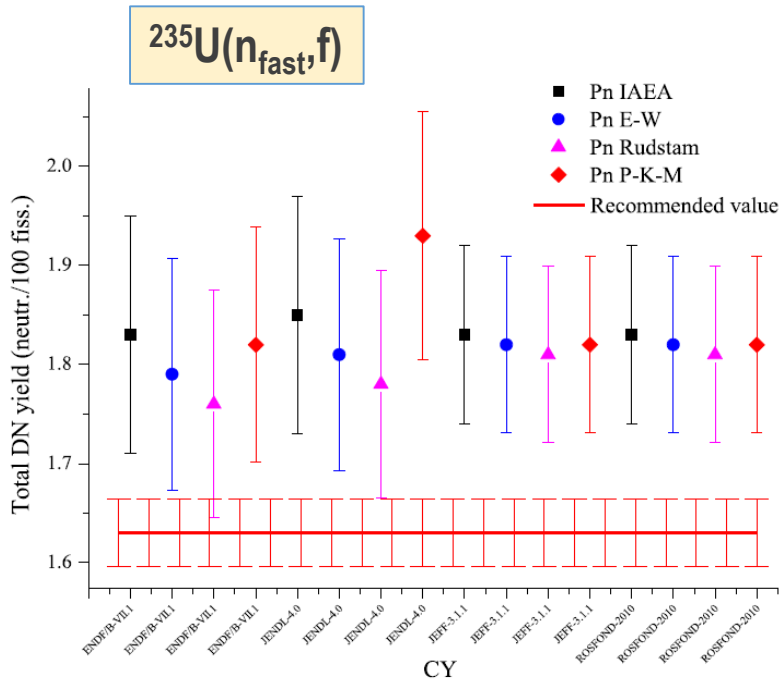
- $N_n^i$  : nombre moyen de neutrons retardés émis par le précurseur  $i$

$$\Rightarrow N_n = 1 \times P_{1n} + 2 \times P_{2n} + \dots$$

où  $P_{xn}$  représentent les probabilités d'émission de  $x$  neutrons retardés

$$P_{1n} = \frac{N_{1n}}{N_{\beta}}$$

- $Y_{cum}^i$  : Rendement cumulé du précurseur  $i$



D.E. Gremyachkin et al. / Progress in Nuclear Energy 83 (2015) 13-25

$$v_d = \sum_i N_n^i Y_{cum}^i$$

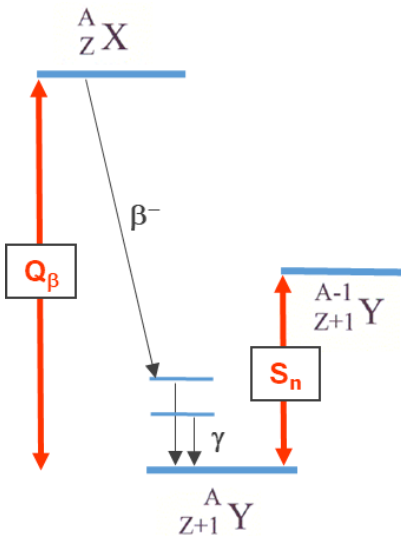
□  $N_n^i$  : nombre moyen de neutrons retardés émis par le précurseur  $i$

➔  $N_n = 1 \times P_{1n} + 2 \times P_{2n} + \dots$

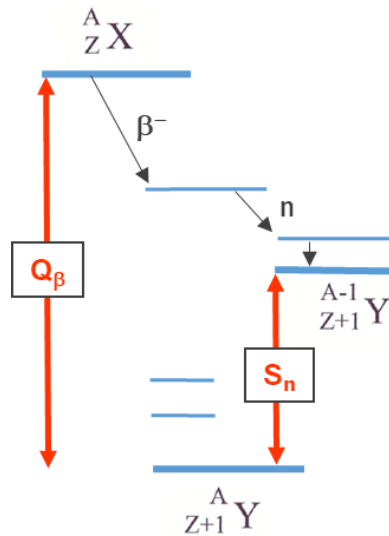
où  $P_{xn}$  représentent les probabilités d'émission de  $x$  neutrons retardés

$$P_{1n} = \frac{N_{1n}}{N_\beta}$$

□  $Y_{cum}^i$  : Rendement cumulé du précurseur  $i$



Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron =  $N_{\beta^-}$

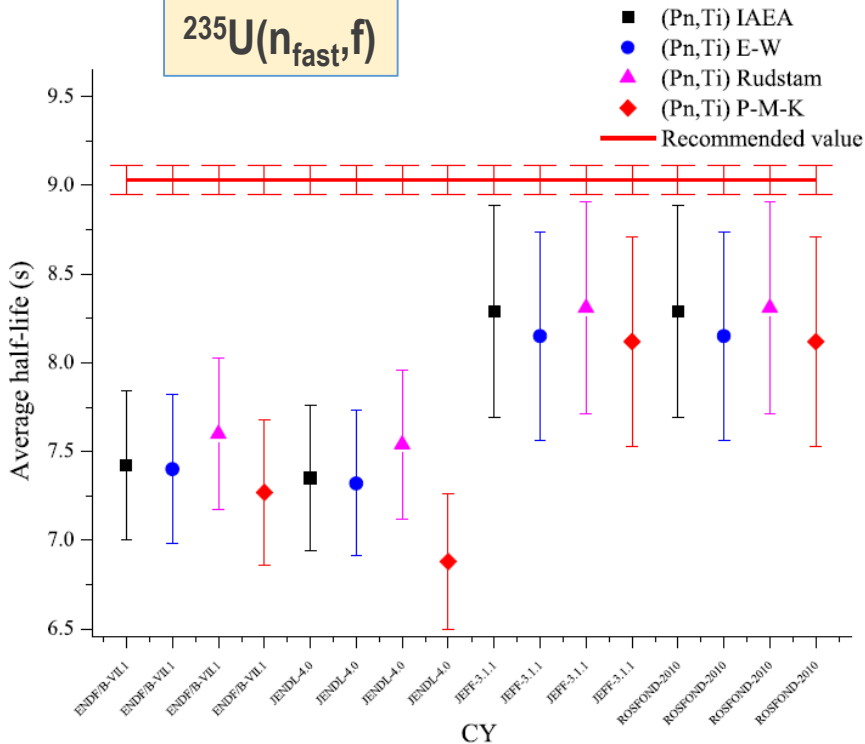


Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron =  $N_{\beta-1n}$

$$\langle T_{1/2} \rangle = \frac{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i T_{1/2}^i}{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i}$$

- $T_{1/2}^i$ : période radioactive  
du précurseur  $i$

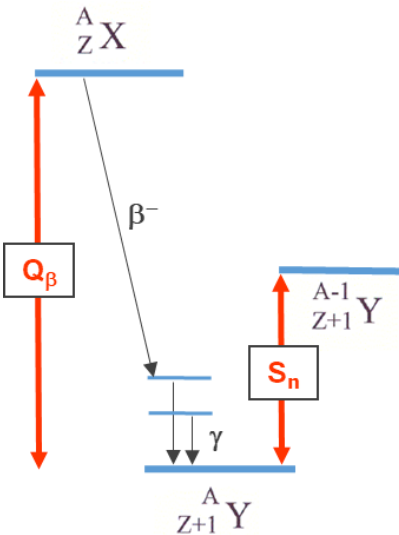


$^{235}\text{U}(n_{\text{fast}}, f)$ 

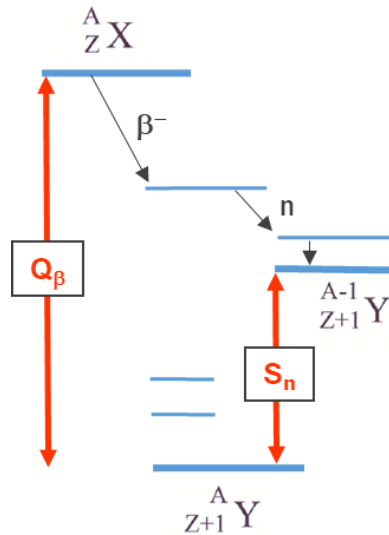
$$\langle T_{1/2} \rangle = \frac{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i T_{1/2}^i}{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i}$$

□  $T_{1/2}^i$ : période radioactive du précurseur  $i$

D.E. Gremyachkin et al. / Progress in Nuclear Energy 83 (2015) 13-25



Transition  $\beta^-$  sans émission  
de neutron retardé;  
Nombre de transitions sans  
neutron =  $N_{\beta^-}$



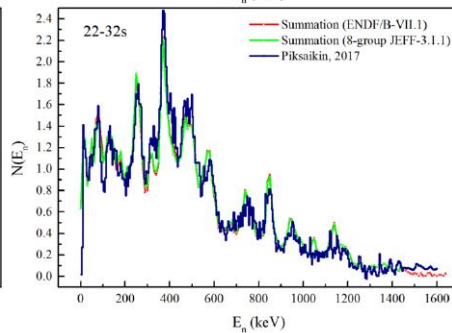
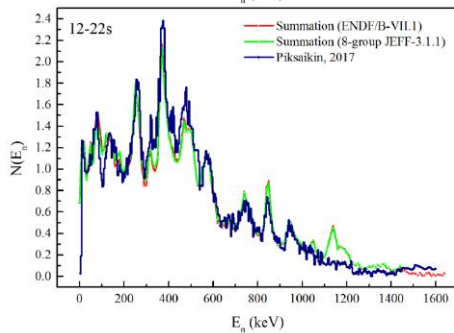
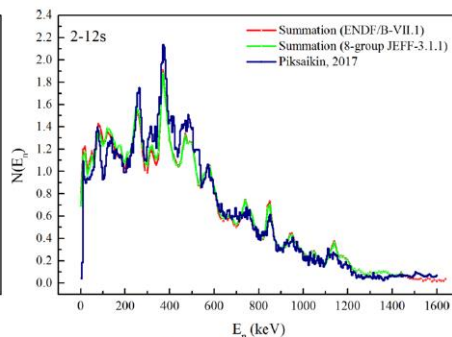
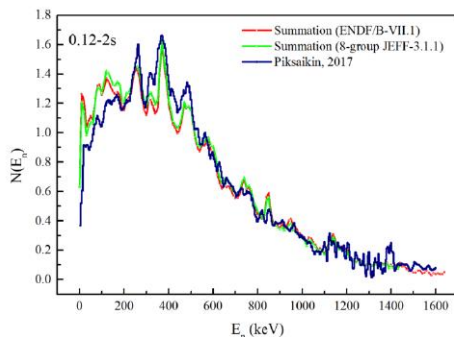
Transition  $\beta^-$  suivi de  
l'émission d'un neutron:  
Nombre de transitions  
avec neutron =  $N_{\beta-1n}$

$$\chi(E) = \frac{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i \chi^i(E)}{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i}$$

- $\chi^i(E)$ : spectre en énergie des neutrons retardés émis par le précurseur  $i$

$^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$ 

$$\chi(E) = \frac{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i \chi^i(E)}{\sum_i N_n^i Y_{cum}^i}$$



Temps d'irradiation de  
l'expérience réalisée par  
Piksaikin : 120 s

V.M. Pixsaikin et al., Ann.  
Nucl. Energy **102**, 408  
(2017).

Figure extraite de  
P. Dimitriou et al.,  
Nuclear Data Sheets 173  
(2021) 144–238

Groupe	Précurseurs	T1/2 (s)	<T1/2> (s)	Abondance (JEFF-3.3)
1	Br-87	55.6	<b>55.60</b>	0.0328 ± 0.0042
2	I-137	24.5	<b>24.50</b>	0.154 ± 0.068
3	Br-88	16.3	<b>16.30</b>	0.0914 ± 0.009
4	I-138	6.46	<b>5.21</b>	0.197 ± 0.023
	Rb-93	5.93		
	Br-89	4.38		
5	Rb-94	2.76	<b>2.37</b>	0.331 ± 0.0066
	I-139	2.30		
	As-85	2.08		
	Y-98	2.00		
6	Kr-93	1.29	<b>1.04</b>	0.0903 ± 0.0045
	Cs-144	1.00		
	I-140	0.86		
7	Br-91	0.542	<b>0.424</b>	0.0812 ± 0.0016
	Rb-95	0.384		
8	Rb-96	0.203	<b>0.195</b>	0.0229 ± 0.0095
	Rb-97	0.170		

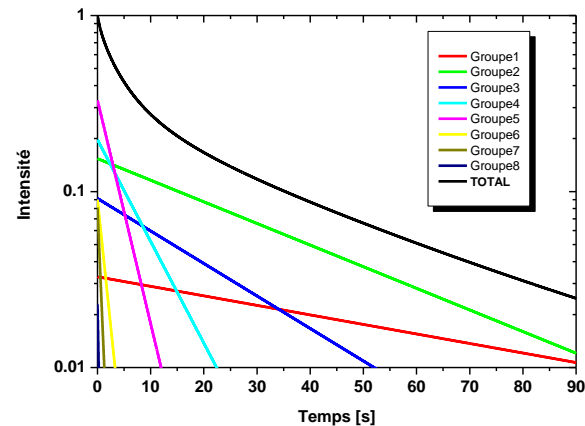
Plus simple avec la mise en groupe

- Paramètres des 8 groupes de précurseurs pour l'<sup>235</sup>U thermique

Groupe	Précurseurs	T1/2 (s)	<T1/2> (s)	Abondance (JEFF-3.3)
1	Br-87	55.6	<b>55.60</b>	$0.0328 \pm 0.0042$
2	I-137	24.5	<b>24.50</b>	$0.154 \pm 0.068$
3	Br-88	16.3	<b>16.30</b>	$0.0914 \pm 0.009$
4	I-138	6.46	<b>5.21</b>	$0.197 \pm 0.023$
	Rb-93 Br-89	5.93 4.38		
5	Rb-94	2.76	<b>2.37</b>	$0.331 \pm 0.0066$
	I-139	2.30		
	As-85	2.08		
	Y-98	2.00		
6	Kr-93	1.29	<b>1.04</b>	$0.0903 \pm 0.0045$
	Cs-144	1.00		
	I-140	0.86		
7	Br-91	0.542	<b>0.424</b>	$0.0812 \pm 0.0016$
	Rb-95	0.384		
8	Rb-96	0.203	<b>0.195</b>	$0.0229 \pm 0.0095$
	Rb-97	0.170		

Plus simple avec la mise en groupe

- Paramètres des 8 groupes de précurseurs pour l' $^{235}\text{U}$  thermique



Groupe	Précurseurs	T1/2 (s)	<T1/2> (s)	Abondance (JEFF-3.3)	Abondance (ALDEN)
1	Br-87	55.6	<b>55.60</b>	$0.0328 \pm 0.0042$	$0.0295 \pm 0.0018$
2	I-137	24.5	<b>24.50</b>	$0.154 \pm 0.068$	$0.1561 \pm 0.0087$
3	Br-88	16.3	<b>16.30</b>	$0.0914 \pm 0.009$	$0.0889 \pm 0.0119$
4	I-138	6.46	<b>5.21</b>	$0.197 \pm 0.023$	$0.1919 \pm 0.0186$
	Rb-93	5.93			
	Br-89	4.38			
5	Rb-94	2.76	<b>2.37</b>	$0.331 \pm 0.0066$	$0.3218 \pm 0.0387$
	I-139	2.30			
	As-85	2.08			
	Y-98	2.00			
6	Kr-93	1.29	<b>1.04</b>	$0.0903 \pm 0.0045$	$0.0995 \pm 0.0556$
	Cs-144	1.00			
	I-140	0.86			
7	Br-91	0.542	<b>0.424</b>	$0.0812 \pm 0.0016$	$0.0737 \pm 0.0681$
	Rb-95	0.384			
8	Rb-96	0.203	<b>0.195</b>	$0.0229 \pm 0.0095$	$0.0385 \pm 0.0405$
	Rb-97	0.170			

Plus simple avec la mise en groupe

❑ Paramètres des 8 groupes de précurseurs pour l'<sup>235</sup>U thermique

❑ Expérience ALDEN:  
P. Leconte, B. Geslot et al...



Figure 2 : the LOENIEv2 long-counter

Groupe	Précurseurs	T1/2 (s)	<T1/2> (s)	Abondance (JEFF-3.3)	Abondance (ALDEN)
1	Br-87	55.6	<b>55.60</b>	0.0328 ± 0.0042	0.0295 ± 0.0018
2	I-137	24.5	<b>24.50</b>	0.154 ± 0.068	0.1561 ± 0.0087
3	Br-88	16.3	<b>16.30</b>	0.0914 ± 0.009	0.0889 ± 0.0119
4	I-138	6.46	<b>5.21</b>	0.197 ± 0.023	0.1919 ± 0.0186
	Rb-93	5.93			
	Br-89	4.38			
5	Rb-94	2.76	<b>2.37</b>	0.331 ± 0.0066	0.3218 ± 0.0387
	I-139	2.30			
	As-85	2.08			
	Y-98	2.00			
6	Kr-93	1.29	<b>1.04</b>	0.0903 ± 0.0045	0.0995 ± 0.0556
	Cs-144	1.00			
	I-140	0.86			
7	Br-91	0.542	<b>0.424</b>	0.0812 ± 0.0016	0.0737 ± 0.0681
	Rb-95	0.384			
8	Rb-96	0.203	<b>0.195</b>	0.0229 ± 0.0095	0.0385 ± 0.0405
	Rb-97	0.170			

Plus simple avec la mise en groupe

❑ Paramètres des 8 groupes de précurseurs pour l'<sup>235</sup>U thermique

❑ Expérience ALDEN:  
P. Leconte, B. Geslot et al...



Figure 2 : the LOENIEv2 long-counter

Groupe	Précurseurs	T1/2 (s)	<T1/2> (s)	Abondance (JEFF-3.3)	Abondance (ALDEN)
1	Br-87	55.6	<b>55.60</b>	0.0328 ± 0.0042	0.0295 ± 0.0018
2	I-137	24.5	<b>24.50</b>	0.154 ± 0.068	0.1561 ± 0.0087
3	Br-88	16.3	<b>16.30</b>	0.0914 ± 0.009	0.0889 ± 0.0119
4	I-138	6.46	<b>5.21</b>	0.197 ± 0.023	0.1919 ± 0.0186
	Rb-93	5.93			
	Br-89	4.38			
5	Rb-94	2.76	<b>2.37</b>	0.331 ± 0.0066	0.3218 ± 0.0387
	I-139	2.30			
	As-85	2.08			
	Y-98	2.00			
6	Kr-93	1.29	<b>1.04</b>	0.0903 ± 0.0045	0.0995 ± 0.0556
	Cs-144	1.00			
	I-140	0.86			
7	Br-91	0.542	<b>0.424</b>	0.0812 ± 0.0016	0.0737 ± 0.0681
	Rb-95	0.384			
8	Rb-96	0.203	<b>0.195</b>	0.0229 ± 0.0095	0.0385 ± 0.0405
	Rb-97	0.170			

Plus simple avec la mise en groupe

❑ Paramètres des 8 groupes de précurseurs pour l'<sup>235</sup>U thermique

❑ Expérience ALDEN:

P. Leconte, B. Geslot et al...

❖ Prochaines Manips: PTB sur l'<sup>238</sup>U(n,f)

❖ ILL sur <sup>241</sup>Pu(n<sub>th</sub>,f)



## 20 principaux précurseurs (P. Dimitriou et al., Nuclear Data Sheets 173 (2021) 144–238)

$^{235}\text{U}(n_{\text{th}},f)$		$^{235}\text{U}(n_{\text{fast}},f)$		$^{238}\text{U}(n_{\text{fast}},f)$		$^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$		$^{239}\text{Pu}(n_{\text{fast}},f)$		$^{241}\text{Pu}(n_{\text{th}},f)$		$^{241}\text{Pu}(n_{\text{fast}},f)$	
Nuclide	CRP	Nuclide	CRP	Nuclide	CRP	Nuclide	CRP	Nuclide	CRP	Nuclide	CRP	Nuclide	CRP
$^{137}\text{I}$	16.3	$^{94}\text{Rb}$	13.5	$^{137}\text{I}$	9.3	$^{137}\text{I}$	25.8	$^{137}\text{I}$	17.7	$^{137}\text{I}$	24.4	$^{137}\text{I}$	21.9
$^{89}\text{Br}$	11.1	$^{137}\text{I}$	12.9	$^{94}\text{Rb}$	7.6	$^{94}\text{Rb}$	10.6	$^{94}\text{Rb}$	13.6	$^{138}\text{I}$	8.4	$^{94}\text{Rb}$	10.4
$^{94}\text{Rb}$	9.3	$^{89}\text{Br}$	11.5	$^{90}\text{Br}$	6.7	$^{98\text{m}}\text{Y}$	9.4	$^{98\text{m}}\text{Y}$	10.8	$^{94}\text{Rb}$	8.0	$^{138}\text{I}$	6.3
$^{90}\text{Br}$	7.4	$^{90}\text{Br}$	8.3	$^{89}\text{Br}$	6.3	$^{89}\text{Br}$	6.2	$^{89}\text{Br}$	9.2	$^{139}\text{I}$	5.8	$^{89}\text{Br}$	6.2
$^{88}\text{Br}$	7.3	$^{88}\text{Br}$	8.2	$^{85}\text{As}$	5.5	$^{138}\text{I}$	5.3	$^{88}\text{Br}$	7.0	$^{98\text{m}}\text{Y}$	5.2	$^{98\text{m}}\text{Y}$	5.9
$^{85}\text{As}$	5.3	$^{98\text{m}}\text{Y}$	5.9	$^{139}\text{I}$	5.4	$^{88}\text{Br}$	5.0	$^{85}\text{As}$	5.2	$^{89}\text{Br}$	4.9	$^{95}\text{Rb}$	4.6
$^{138}\text{I}$	4.7	$^{85}\text{As}$	5.0	$^{135}\text{Sb}$	5.0	$^{93}\text{Rb}$	4.0	$^{90}\text{Br}$	5.1	$^{135}\text{Sb}$	3.9	$^{90}\text{Br}$	4.5
$^{98\text{m}}\text{Y}$	4.1	$^{95}\text{Rb}$	5.0	$^{91}\text{Br}$	4.8	$^{99}\text{Y}$	3.9	$^{99}\text{Y}$	4.6	$^{99}\text{Y}$	3.4	$^{139}\text{I}$	3.9
$^{139}\text{I}$	3.5	$^{138}\text{I}$	3.9	$^{138}\text{I}$	4.6	$^{90}\text{Br}$	3.6	$^{93}\text{Rb}$	4.6	$^{90}\text{Br}$	3.3	$^{85}\text{As}$	3.4
$^{95}\text{Rb}$	3.5	$^{93}\text{Rb}$	3.6	$^{95}\text{Rb}$	4.2	$^{95}\text{Rb}$	3.4	$^{95}\text{Rb}$	4.1	$^{95}\text{Rb}$	3.2	$^{99}\text{Y}$	3.3
$^{93}\text{Rb}$	3.4	$^{87}\text{Br}$	3.1	$^{88}\text{Br}$	2.8	$^{139}\text{I}$	2.8	$^{87}\text{Br}$	2.8	$^{88}\text{Br}$	3.1	$^{88}\text{Br}$	3.1
$^{87}\text{Br}$	3.2	$^{99}\text{Y}$	3.0	$^{145}\text{Cs}$	2.4	$^{85}\text{As}$	2.8	$^{138}\text{I}$	2.7	$^{85}\text{As}$	2.5	$^{105}\text{Nb}$	2.4
$^{91}\text{Br}$	2.7	$^{91}\text{Br}$	2.5	$^{96}\text{Rb}$	2.2	$^{87}\text{Br}$	2.5	$^{91}\text{Br}$	1.6	$^{136}\text{Te}$	2.3	$^{93}\text{Rb}$	2.4
$^{99}\text{Y}$	2.2	$^{139}\text{I}$	2.2	$^{99}\text{Y}$	2.0	$^{135}\text{Sb}$	1.5	$^{105}\text{Nb}$	1.3	$^{93}\text{Rb}$	2.2	$^{135}\text{Sb}$	2.3
$^{135}\text{Sb}$	2.1	$^{143}\text{Cs}$	1.4	$^{98\text{m}}\text{Y}$	2.0	$^{143}\text{Cs}$	1.4	$^{139}\text{I}$	1.1	$^{143}\text{Cs}$	2.0	$^{91}\text{Br}$	2.0
$^{136}\text{Te}$	1.6	$^{96}\text{Rb}$	1.3	$^{97}\text{Rb}$	1.9	$^{136}\text{Te}$	1.4	$^{96}\text{Rb}$	0.9	$^{105}\text{Nb}$	1.6	$^{143}\text{Cs}$	1.6
$^{143}\text{Cs}$	1.6	$^{86}\text{As}$	0.7	$^{136}\text{Sb}$	1.7	$^{105}\text{Nb}$	1.2	$^{143}\text{Cs}$	0.7	$^{91}\text{Br}$	1.2	$^{136}\text{Te}$	1.4
$^{86}\text{As}$	0.9	$^{135}\text{Sb}$	0.6	$^{140}\text{I}$	1.7	$^{91}\text{Br}$	1.1	$^{86}\text{As}$	0.6	$^{137}\text{Te}$	1.2	$^{96}\text{Rb}$	1.4
$^{96}\text{Rb}$	0.9	$^{136}\text{Te}$	0.6	$^{141}\text{I}$	1.6	$^{96}\text{Rb}$	0.8	$^{136}\text{Te}$	0.6	$^{87}\text{Br}$	1.2	$^{106}\text{Nb}$	1.2
$^{137}\text{Te}$	0.8	$^{97}\text{Rb}$	0.5	$^{93}\text{Rb}$	1.6	$^{137}\text{Te}$	0.5	$^{135}\text{Sb}$	0.5	$^{145}\text{Cs}$	1.0	$^{87}\text{Br}$	1.2

## Liste prioritaires

Approche  
microscopique



As-85, As-86
Br-87, Br-88, Br-89, Br-90, Br-91
Rb-93, Rb-94, Rb-95, Rb-96, Rb-97
Y-98m, Y-99
Nb-105, Nb-106
Sb-135, Sb-136
Te-136, Te-137
I-137, I-138, I-139, I-140
Cs-143, Cs-145

Approche par  
groupe



Br-87
I-137
Br-88
I-138
Rb-93
Br-89
Rb-94
I-139
As-85
Y-98
Kr-93
Cs-144
I-140
Br-91
Rb-95
Rb-96
Rb-97

## Liste élargie

Liste plus exhaustive:

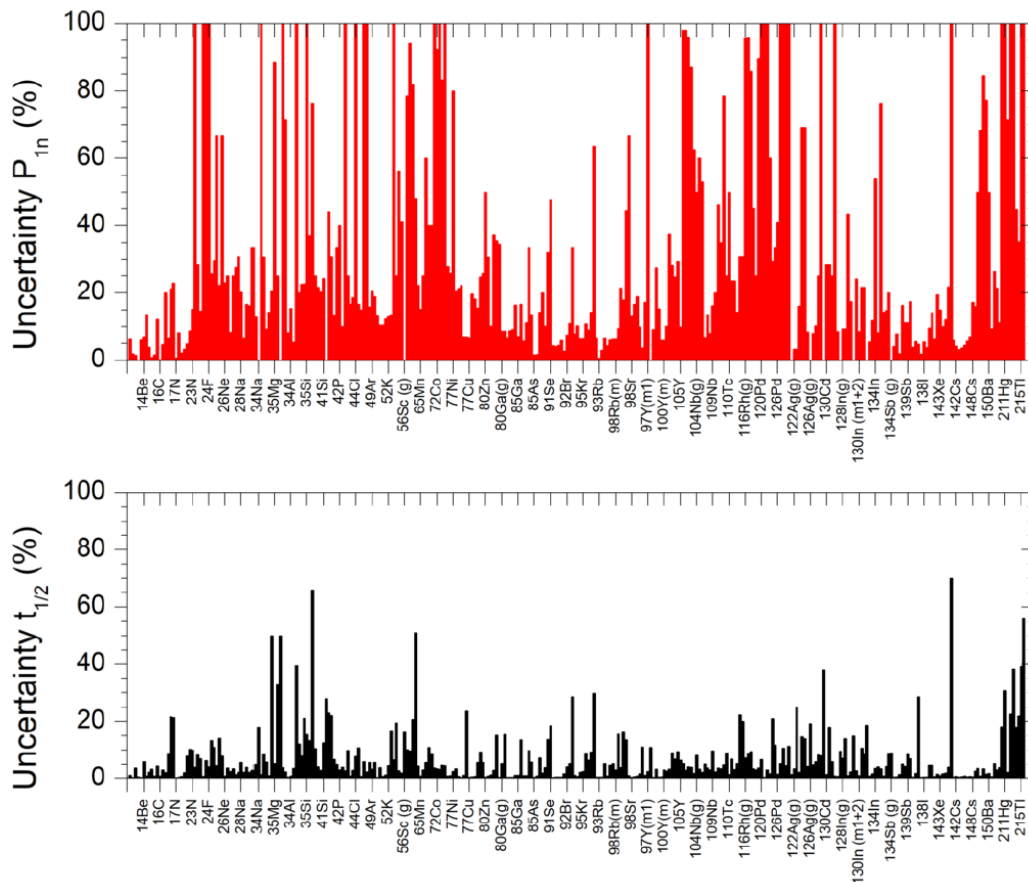
50 premiers noyaux pour lesquels il serait intéressant de mesurer  
outre la Pn et la période, les **spectres d'émission neutron**:

Peu de données expérimentales, pas d'incertitude

➡ Rend possible la construction des spectres par groupe.

Presursor	<sup>87</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>141</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>137</sup> <sub>53</sub> I	<sup>136</sup> <sub>52</sub> Te	<sup>88</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>72</sup> <sub>29</sub> Cu	<sup>146</sup> <sub>57</sub> La	<sup>138</sup> <sub>53</sub> I	<sup>93</sup> <sub>37</sub> Rb
T <sub>1/2</sub> , s	55.65	24.84	24.5	17.63	16.29	6.49	6.27	6.23	5.84
Presursor	<sup>92</sup> <sub>37</sub> Rb	<sup>89</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>79</sup> <sub>31</sub> Ga	<sup>94</sup> <sub>37</sub> Rb	<sup>139</sup> <sub>53</sub> I	<sup>119</sup> <sub>47</sub> Ag	<sup>85</sup> <sub>33</sub> As	<sup>90</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>114</sup> <sub>45</sub> Rh
T <sub>1/2</sub> , s	4.49	4.40	2.85	2.70	2.28	2.1	2.02	1.91	1.85
Presursor	<sup>143</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>119</sup> <sub>46</sub> Pd	<sup>142</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>80</sup> <sub>31</sub> Ga	<sup>135</sup> <sub>51</sub> Sb	<sup>103</sup> <sub>41</sub> Nb	<sup>148</sup> <sub>57</sub> La	<sup>129</sup> <sub>49</sub> In	<sup>120</sup> <sub>47</sub> Ag
T <sub>1/2</sub> , s	1.79	1.76	1.684	1.68	1.68	1.5	1.26	1.23	1.23
Presursor	<sup>81</sup> <sub>31</sub> Ga	<sup>134</sup> <sub>50</sub> Sn	<sup>144</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>147</sup> <sub>56</sub> Ba	<sup>140</sup> <sub>53</sub> I	<sup>113</sup> <sub>44</sub> Ru	<sup>129m</sup> <sub>49</sub> In	<sup>148</sup> <sub>56</sub> Ba	<sup>145</sup> <sub>55</sub> Cs
T <sub>1/2</sub> , s	1.22	1.05	0.99	0.89	0.86	0.8	0.61	0.61	0.59
Presursor	<sup>91</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>120</sup> <sub>46</sub> Pd	<sup>141</sup> <sub>53</sub> I	<sup>95</sup> <sub>37</sub> Rb	<sup>92</sup> <sub>35</sub> Br	<sup>146</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>130</sup> <sub>49</sub> In	<sup>147</sup> <sub>55</sub> Cs	<sup>96</sup> <sub>37</sub> Rb
T <sub>1/2</sub> , s	0.54	0.5	0.43	0.38	0.34	0.32	0.29	0.23	0.2
Presursor	<sup>97</sup> <sub>37</sub> Rb	<sup>98</sup> <sub>37</sub> Rb							
T <sub>1/2</sub> , s	0.17	0.11							

P. Leconte

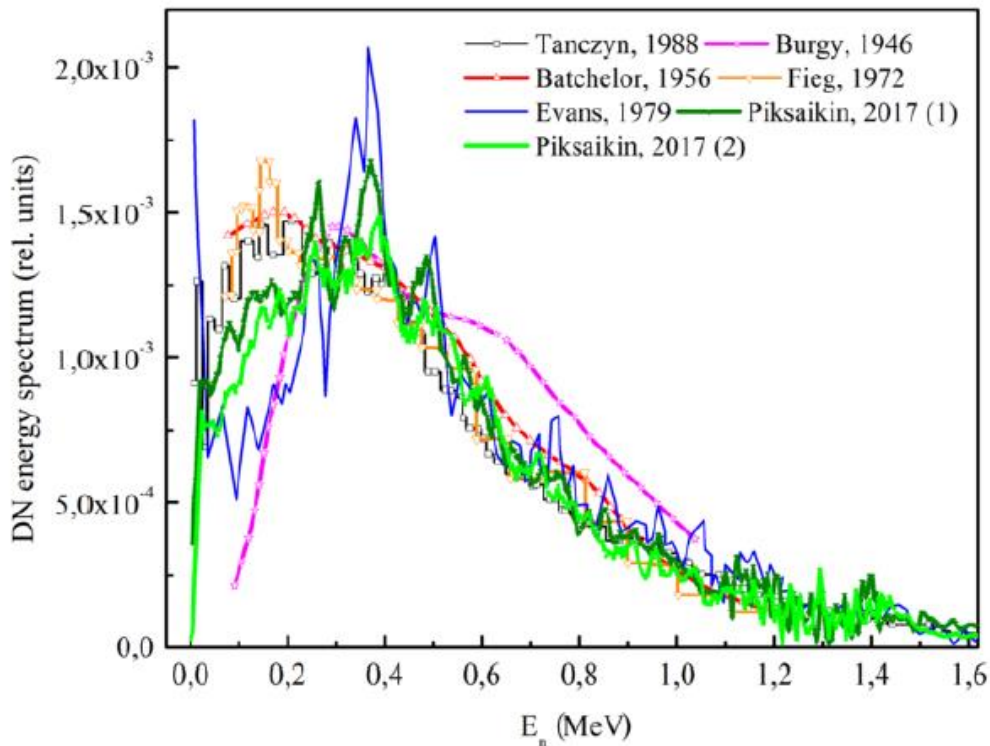


L'incertitude sur la quantité  $P_{1n}$  reste souvent trop élevée, généralement bien supérieure à celle de la période

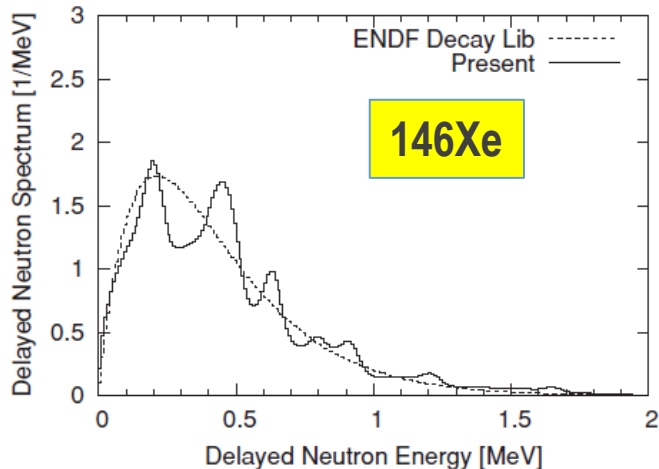
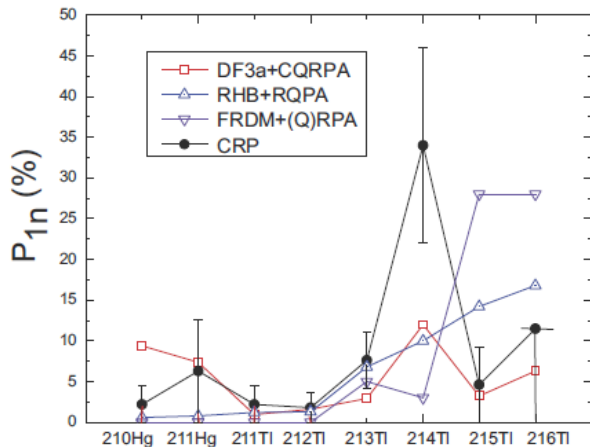
Figure extraite de :  
P. Dimitriou et al.,  
Nuclear Data Sheets 173  
(2021) 144–238

## Exemple de mesure de spectre

Figure extraite de :  
P. Dimitriou et al.,  
Nuclear Data Sheets 173  
(2021) 144–238



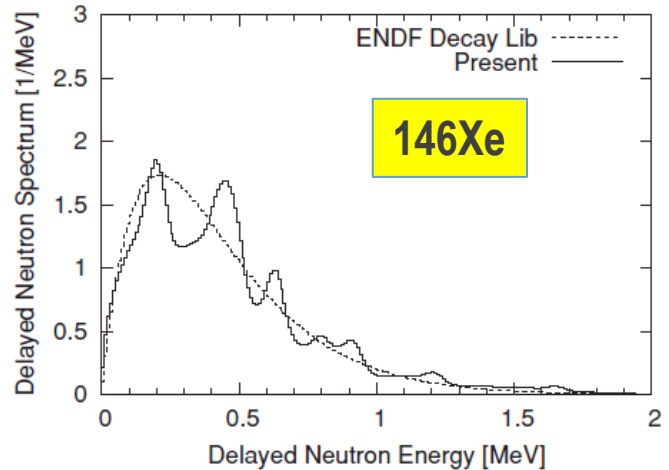
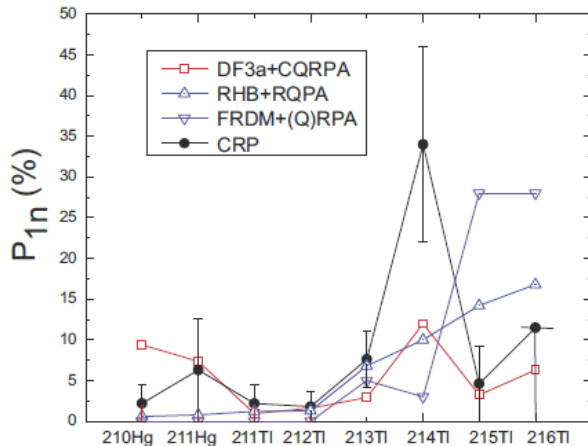
$P_{1n}$ : Comparaison  
Théorie – Expérience  
Hg (Z=80) et Tl (Z=81)



- $Q_\beta$  calculé à partir des masses (Finite Range Droplet Model),
- Éléments de matrice de décroissance à partir du modèle QRPA

T. Kawano, P. Moller, and W. B. Wilson,  
Phys. Rev. C **78**, 054601 (2008)

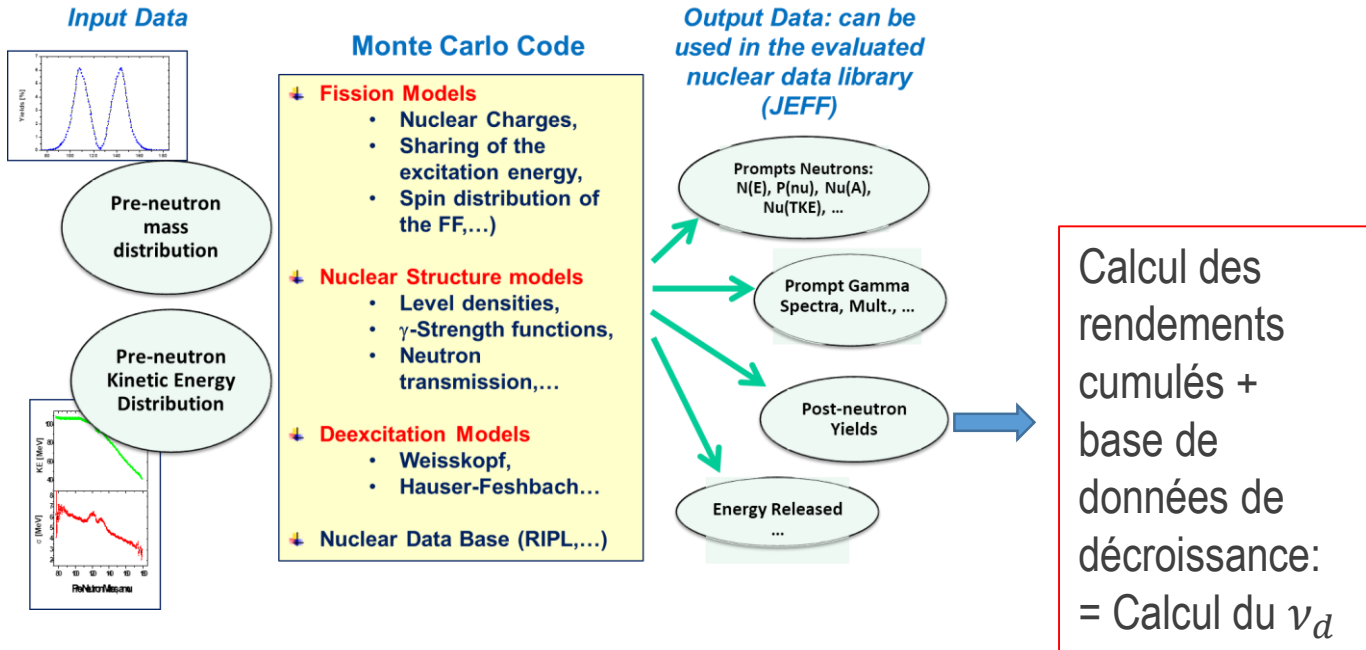
$P_{1n}$ : Comparaison  
Théorie – Expérience  
Hg (Z=80) et Tl (Z=81)



- $Q_\beta$  calculé à partir des masses (Finite Range Droplet Model),
- Éléments de matrice de décroissance à partir du modèle QRPA

T. Kawano, P. Moller, and W. B. Wilson,  
Phys. Rev. C **78**, 054601 (2008)

## Code Monte Carlo FIFRELIN (CEA-Cadarache)





- ❑ Travail considérable réalisé dans le cadre d'un CRP à l'AIEA:  
P. Dimitriou et al.,  
Development of a Reference Database for Beta-Delayed  
Neutron Emission, Nuclear Data Sheets 173 (2021) 144–238
  
- ❑ Nombreux développements réalisés ces dernières années à la fois sur le plan théorique et expérimental : très encourageant !

