

Titre du document : Études des schémas de désintégrations
N° chrono : DOC-FO-5_2
Version du : 03/06/2018

Auteur : M. Ammerich

Résumé : Comment aborder l'étude d'un schéma de désintégration.

ETUDE DE SCHÉMAS DE DESINTÉGRATION



A. Introduction

Je vous propose de vous donner les éléments pour faire l'analyse d'un schéma de désintégration.

Vous pouvez bien entendu trouver toutes les données dans les tables (comme la « mini tables des radionucléides » ou « radionucléides et radioprotection ») ou des données plus élaborées comme celles des tables des radionucléides sous forme papier ou par Internet.

L'idée est de vous montrer comment on procède pour définir les différents rayonnements et leurs intensités.

À titre d'exemple j'ai choisi de prendre deux radionucléides : l'iode-131 et le technétium-99m.



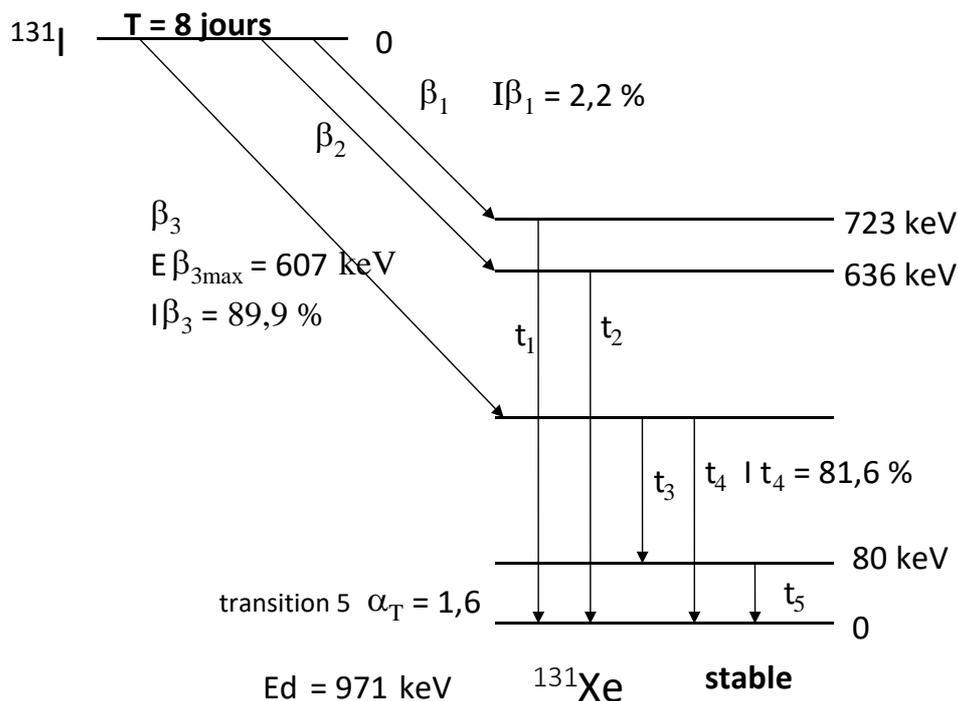
B. L'iode-131

On utilise l'iode radioactif dans le domaine médical et plus particulièrement l'iode-131 dans le cadre thérapeutique (traitement de cancers thyroïdiens).

Dans le domaine nucléaire, c'est un produit de fission que l'on peut rencontrer dans les réacteurs et qu'il faut quantifier en termes de rejets.

On l'a notamment observé à Tchernobyl et Fukushima.

Le schéma de désintégration de l'iode-131 est le suivant :



On donne l'énergie de liaison des électrons de la couche K du Xénon : 34,6 keV

On donne l'énergie de liaison des électrons de la couche L du Xénon : 5,1 keV

E_d = énergie disponible entre les niveaux fondamentaux

Le rendement de fluorescence de la couche K noté $RK = 87,1\%$

Nous allons dresser le tableau des rayonnements émis par l'iode-131 en distinguant les rayonnements particuliers des rayonnements électromagnétiques en donnant leurs énergies et intensités d'émissions.

1 Les désintégrations

Il est d'usage de commencer par établir les énergies et intensités d'émission des rayonnements issus de la désintégration.

En l'occurrence, dans cet exercice, les rayonnements bêta.

L'énergie disponible entre les niveaux fondamentaux va être la base de départ.



1.1 Pour le rayonnement bêta 1

$E_{\beta 1 \max} = E_d$ – énergie du niveau excité sur laquelle arrive la désintégration

$$E_{\beta 1 \max} = 971 - 723 = 248 \text{ keV}$$

1.2 Pour le rayonnement bêta 2

$E_{\beta 2 \max} = E_d$ – énergie du niveau excité sur laquelle arrive la désintégration

$$E_{\beta 2 \max} = 971 - 636 = 335 \text{ keV}$$

L'ensemble des intensités des désintégrations est toujours égal à 100 %. Nous allons donc pouvoir écrire

1.3 Pour les intensités d'émission

$$I_{\beta 1} + I_{\beta 2} + I_{\beta 3} = 100 \%$$

Il n'y a que bêta 2 dont on ne connaît pas l'intensité.

$$I_{\beta 2} = 100 \% - (I_{\beta 1} + I_{\beta 3})$$

$$I_{\beta 2} = 100 \% - (89,9 + 2,2) = 7,9 \%$$

Nous avons donc l'ensemble des énergies et intensités pour les désintégrations.

2 Les désexcitations

Il y a donc 5 transitions partant des niveaux excités. Pour t_5 il y a le coefficient α , qui indique qu'il y a une émission de rayonnements gamma et une émission d'électrons de conversion interne (ci).

2.1 Pour la transition 1

L'énergie du rayonnement gamma sera :

E niveau excité – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 1} = 723 - 0 = 723 \text{ keV}$$

L'intensité d'émission du rayonnement gamma sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici c'est la désintégration bêta 1

$$I_{\gamma 1} = I_{\beta 1} = 2,2 \%$$

2.2 Pour la transition 2

L'énergie du rayonnement gamma sera :

E niveau excité – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 2} = 636 - 0 = 636 \text{ keV}$$

L'intensité d'émission du rayonnement gamma sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici c'est la désintégration bêta 2

$$I_{\gamma 2} = I_{\beta 2} = 7,9 \%$$



2.3 Pour les transitions 3 et 4

L'intensité d'émission des rayonnements gamma sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici c'est la désintégration bêta 3

$$I_{\gamma 3} + I_{\gamma 4} = I_{\beta 3} = 89,9 \%$$

$$\text{Or } I_{t4} = I_{\gamma 4} = 81,6 \%$$

$$I_{\gamma 3} = 89,9 - 81,6 = 8,3 \%$$

L'énergie du niveau excité d'où partent les transitions t3 et t4

$$\text{Énergie du niveau excité} = E_d - E_{\beta 3_{\max}}$$

$$E^* = 971 - 607 = 364 \text{ keV}$$

L'énergie du rayonnement gamma 3 sera :

E niveau excité départ – E niveau excité arrivée

$$E_{\gamma 3} = 364 - 80 = 284 \text{ keV}$$

L'énergie du rayonnement gamma 4 sera :

E niveau excité – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 4} = 364 - 0 = 364 \text{ keV}$$

2.4 Pour la transitions 5

$$I_{t5} = I_{t3}$$

$$I_{t5} = 8,3\%$$

$$\alpha_5 = 1,6$$

$$\alpha_5 = \frac{I_{CI5}}{I_{\gamma 5}}$$

$$I_{t5} = I_{CI5} + I_{\gamma 5}$$

$$I_{CI5} = I_{\gamma 5} \cdot \alpha_5$$

$$I_{CI5} = I_{\gamma 5} \cdot 1,6$$

Soit :

$$2,6 I_{\gamma 5} = I_{t5}$$

$$I_{\gamma 5} = 8,3/2,6 = 3,2 \%$$

$$I_{CI5} = 8,3 - 3,2 = 5,1 \%$$

Il y a donc 3,2 % d'émission gamma et 5,1 % d'émission de conversion interne.

L'énergie du rayonnement gamma 5 sera :

E niveau excité – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 5} = 80 - 0 = 80 \text{ keV}$$

L'énergie des électrons de conversion interne sera égale à l'énergie du rayonnement gamma (niveau excité) moins l'énergie de liaison des électrons. On considère que la conversion interne se fera préférentiellement sur la couche K.

$$E_{eci5} = E_{\gamma 5} - E_{I_K} \text{ xenon}$$

$$E_{eci5} = 80 - 34,6 = 45,4 \text{ keV}$$



3 Les autres rayonnements

Les électrons de conversion interne créent des lacunes dans la couche K. Il va donc y avoir un réarrangement du cortège électronique avec émission possible de rayonnements X (X) et d'électrons Auger (eA).

$$I_{ci} = 5,1 \%$$

$$I_X + I_{eA} = I_{ci}$$

L'intensité d'émission des rayonnements X est donnée par le rendement de fluorescence.

$$I_X = I_{ci} \times R_K$$

$$I_X = 5,1 \times 0,869 = 4,4 \%$$

$$I_{eA} = I_{ci} - I_X$$

$$I_{eA} = 5,1 - 4,4 = 0,7 \%$$

L'énergie des rayonnements X correspond à la différence des énergies de liaison, c'est-à-dire à l'énergie de liaison de la couche moins l'énergie de liaison de la couche L.

L'énergie des électrons Auger correspond à l'énergie de liaison de la couche moins deux fois l'énergie de liaison de la couche L.

$$E_X = E_{L_K \text{ xenon}} - E_{L_L \text{ xenon}}$$

$$E_X = 34,6 - 5,1 = 29,5 \text{ keV}$$

$$E_{eA} = E_{L_K \text{ xenon}} - 2 \times E_{L_L \text{ xenon}}$$

$$E_{eA} = 34,6 - 10,2 = 24,4 \text{ keV}$$

4 Le tableau

Comme dans le cas des tables de données nous allons présenter les résultats dans un tableau en ordonnant les rayonnements par type, par énergie ou intensité d'émission.

| | Rayonnements | Energie en keV | Intensité d'émission en % |
|------------------------------------|--------------|----------------|---------------------------|
| Rayonnements Particulaires | β_3 | 607 | 89,9 |
| | β_2 | 335 | 7,9 |
| | β_1 | 248 | 2,2 |
| | eci5 | 45,4 | 5,1 |
| | eA | 24,4 | 0,7 |
| Rayonnements Electromagnétiques | $I\gamma_1$ | 723 | 2,2 |
| | $I\gamma_2$ | 636 | 7,9 |
| | $I\gamma_4$ | 364 | 81,6 |
| | $I\gamma_3$ | 284 | 8,3 |
| | $I\gamma_5$ | 80 | 3,2 |
| | IX | 29,5 | 4,4 |

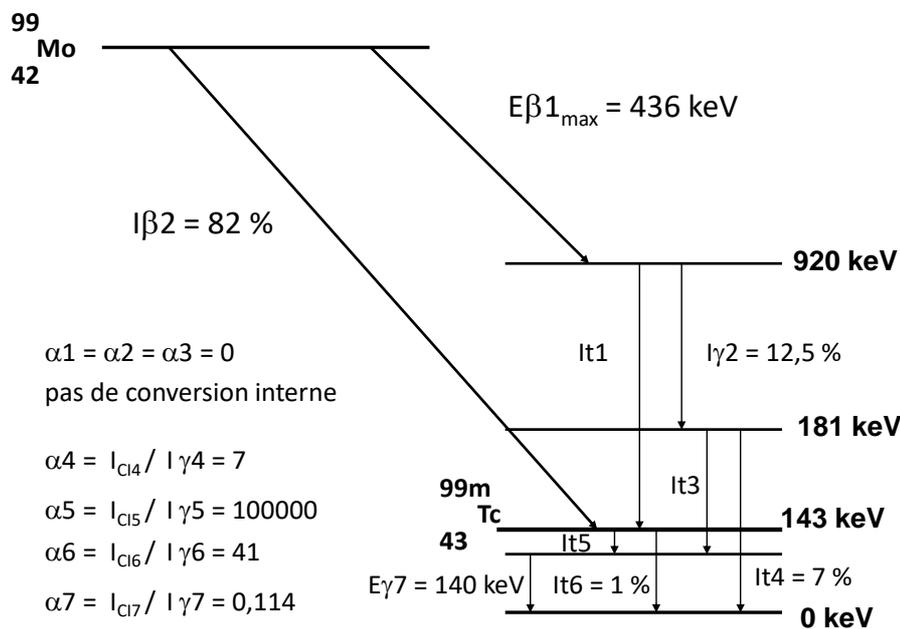
C. Le molybdène-99 et le technétium-99m

Le technétium-99m est utilisé en médecine nucléaire à des fins diagnostiques et thérapeutiques. Il est issu de la décroissance du molybdène-99. On l'obtient par élution (séparation chimique). Voici la photo d'un "générateur" commercialisé sur le marché international.

Le molybdène-99 est aussi un produit de fission.



Le schéma simplifié de désintégration du molybdène-99 et du technétium-99 m est le suivant :



Energie de liaison des électrons K du technétium = 21 keV

On donne l'énergie de liaison des électrons de la couche K du technétium : 21,04 keV

On donne l'énergie de liaison des électrons de la couche L du technétium : 2,73 keV

L'énergie de liaison des électrons de la couche M du technétium varie entre 0,55 et 0,25 keV.

Le rendement de fluorescence de la couche K est noté R_K . Il est égal à 75 % : $R_K = 75 \%$



Le rendement de fluorescence sur la couche L est négligeable.

La période du molybdène 99 est égale à 66 heures. La période du technétium 99m est égale à 6 heures.

Nous allons dresser le tableau des rayonnements émis par le molybdène-99 et le technétium-99m en distinguant les rayonnements particuliers des rayonnements électromagnétiques en donnant leurs énergies et intensités d'émissions.

1 Les désintégrations

Il est d'usage de commencer par établir les énergies et intensités d'émission des rayonnements issus de la désintégration.

En l'occurrence, dans cet exercice, les rayonnements bêta.

L'énergie de la désintégration bêta 1 va être la base de départ.

Pour bêta 2

$E\beta_{2_{\max}} = E\beta_{1_{\max}} + \text{différence entre les niveaux excités sur lesquels arrivent bêta 1 et bêta 2}$

$$E\beta_{2_{\max}} = 436 - (920 - 143) = 1213 \text{ keV}$$

L'ensemble des intensités des désintégrations est toujours égal à 100 %. Nous allons donc pouvoir écrire

$$I\beta_1 + I\beta_2 = 100 \%$$

$$I\beta_1 = 100 \% - I\beta_2$$

$$I\beta_1 = 100 \% - 82 = 18 \%$$

Nous avons donc l'ensemble des énergies et intensités pour les désintégrations.

2 Les désexcitations

Il y a donc 7 transitions partant des niveaux excités. Pour t4, t5, t6 et t7 il y a le coefficient α , qui indique qu'il y a une émission de rayonnements gamma et une émission d'électrons de conversion interne (ci).

Pour t5 la valeur de alpha est très élevée. D'autre part l'énergie entre les transitions est très faible (très inférieure aux énergies de liaison des électrons internes). On peut donc considérer qu'il n'y a que des électrons de conversion interne. Leur énergie correspond à la différence d'énergie entre les transitions.

2.1 Pour les transitions 1 et 2

L'énergie du rayonnement gamma 1 sera :

E niveau excité départ – E niveau excité arrivée

$$E\gamma_1 = 920 - 143 = 777 \text{ keV}$$

L'énergie du rayonnement gamma 2 sera :

E niveau excité départ – E niveau excité arrivée

$$E\gamma_2 = 920 - 181 = 739 \text{ keV}$$



L'intensité d'émission des rayonnements gamma sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici c'est la désintégration bêta 1

$$I_{\gamma 1} + I_{\gamma 2} = I_{\beta 1} = 18 \%$$

$$\text{Or } I_{\gamma 2} = 12,5 \%$$

$$I_{\gamma 1} = 18 - 12,5 = 5,5 \%$$

2.2 Pour les transitions 3 et 4

L'énergie du rayonnement gamma 3 sera :

E niveau excité – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 3} = 181 - 0 = 181 \text{ keV}$$

L'énergie du rayonnement gamma 4 sera :

E niveau excité départ – E niveau excité arrivée

$$E_{\gamma 4} = 181 - 140 = 41 \text{ keV}$$

140 keV étant l'énergie du niveau excité d'où part la transition 7.

Or il y a pour ce niveau de la conversion interne, puisque $\alpha_4 = 7$

L'énergie des électrons de conversion interne sera égale à l'énergie du rayonnement gamma (niveau excité) moins l'énergie de liaison des électrons. On considère que la conversion interne se fera préférentiellement sur la couche K.

$$E_{eci4} = E_{\gamma 4} - E_{K \text{ technétium}}$$

$$E_{eci4} = 41 - 21,04 = 19,96 \text{ keV}$$

L'intensité d'émission des rayonnements gamma et des électrons de conversion interne sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici, c'est la transition 2

$$I_{\gamma 3} + I_{t4} = I_{\gamma 2} = 12,5 \%$$

$$\text{Or } I_{t4} = 7 \%$$

$$I_{\gamma 3} = 12,5 - 7 = 5,5 \%$$

$$\alpha_4 = 7$$

$$\alpha_4 = \frac{I_{CI4}}{I_{\gamma 4}}$$

$$I_{t4} = I_{CI4} + I_{\gamma 4}$$

$$I_{CI4} = I_{\gamma 4} \cdot \alpha_4$$

$$I_{CI4} = I_{\gamma 4} \cdot 7$$

Soit :

$$8 I_{\gamma 4} = I_{t4}$$

$$I_{\gamma 4} = \frac{7}{8} = 0,88 \%$$

$$I_{CI4} = 7 - 0,88 = 6,12 \%$$

Il y a donc 0,88 % d'émission gamma et 6,12 % d'émission de conversion interne.

2.3 Pour les transitions 5 et 6

Pour t5 la valeur de alpha est très élevée. D'autre part l'énergie entre les transitions est très



faible (très inférieure aux énergies de liaison des électrons internes).

On peut donc considérer qu'il n'y a que des électrons de conversion interne. Leur énergie correspond à la différence d'énergie entre les transitions, soit 3 keV.

On peut considérer que ce phénomène se passe à partir des électrons qui sont sur la couche M, la couche L ayant déjà une énergie de liaison du même ordre de grandeur.

L'énergie du rayonnement gamma 6 sera :

E niveau excité départ – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 6} = 143 - 0 = 143 \text{ keV}$$

Or il y a pour ce niveau de la conversion interne, puisque $\alpha_6 = 41$

L'énergie des électrons de conversion interne sera égale à l'énergie du rayonnement gamma (niveau excité) moins l'énergie de liaison des électrons. On considère que la conversion interne se fera préférentiellement sur la couche K.

$E_{eci6} = E_{\gamma 6} - E_{K \text{ technétium}}$

$$E_{eci6} = 143 - 21,04 = 121,96 \text{ keV}$$

L'intensité d'émission des rayonnements gamma et des électrons de conversion interne sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici c'est la somme des intensités de la désintégration bêta 2 et de la transition 1 donc de l'intensité de gamma 1.

$$I_{t5} + I_{t6} = I_{\beta 2} + I_{\gamma 1}$$

$$I_{t5} + I_{t6} = 82 + 5,5 = 87,5 \%$$

$$\text{Or } I_{t6} = 1\%$$

$$I_{ci5} = 87,5 - 1 = 86,5 \%$$

$$\alpha_6 = 41$$

$$\alpha_6 = \frac{I_{CI6}}{I_{\gamma 6}}$$

$$I_{t6} = I_{ci6} + I_{\gamma 6}$$

$$I_{CI6} = I_{\gamma 6} \cdot \alpha_6$$

$$I_{CI6} = I_{\gamma 6} \cdot 41$$

Soit :

$$42 I_{\gamma 6} = I_{t6}$$

$$I_{\gamma 6} = 1/42 = 0,024 \%$$

On va donc considérer aussi qu'il n'y a que des électrons de conversion interne.

$$I_{ci6} = 1 \%$$

2.4 Pour la transition 7

L'énergie du rayonnement gamma 7 sera :

E niveau excité départ – E niveau fondamental

$$E_{\gamma 7} = 140 - 0 = 140 \text{ keV}$$



Or il y a pour ce niveau de la conversion interne, puisque $\alpha_7 = 0,114$

L'énergie des électrons de conversion interne sera égale à l'énergie du rayonnement gamma (niveau excité) moins l'énergie de liaison des électrons. On considère que la conversion interne se fera préférentiellement sur la couche K.

$$E_{eci7} = E_{\gamma 7} - E_{K \text{ technétium}}$$

$$E_{eci7} = 140 - 21,04 = 118,96 \text{ keV}$$

L'intensité d'émission des rayonnements gamma et des électrons de conversion interne sera celle qui est apportée au niveau excité correspondant. Ici c'est la somme des intensités de la transition 5 et de la transition 3.

$$I_{t7} = I_{t3} + I_{t5}$$

$$I_{t7} = 87,5 + 5,5 = 93 \%$$

$$\alpha_7 = 0,114$$

$$\alpha_7 = \frac{I_{CI7}}{I_{\gamma 7}}$$

$$I_{t7} = I_{ci7} + I_{\gamma 7}$$

$$I_{CI7} = I_{\gamma 7} \cdot \alpha_7$$

$$I_{CI7} = I_{\gamma 7} \cdot 0,114$$

Soit :

$$1,114 I_{\gamma 7} = I_{t7}$$

$$I_{\gamma 7} = 93/1,114 = 83,5 \%$$

$$I_{ci7} = 93 - 83,5 = 9,5 \%$$

3 Les autres rayonnements

Les électrons de conversion interne créent des lacunes dans la couche K. D'autres le font dans la couche L et d'autres dans la couche M.

Il va donc y avoir un réarrangement du cortège électronique avec émission possible de rayonnements X (X) et d'électrons Auger (eA).

Quels sont les électrons de conversion interne qui peuvent contribuer à créer des lacunes dans la couche K ?

$E_{ci4} = 19,96 \text{ keV}$: lacunes dans la couche L

$E_{ci5} = 3 \text{ keV}$: lacunes dans la couche M

$E_{ci6} = 121,96 \text{ keV}$: lacunes dans la couche K

$E_{ci7} = 118,96 \text{ keV}$: lacunes dans la couche K

$$I_{ci6} = 1 \%$$

$$I_{ci7} = 9,5 \%$$

$$I_{ci \text{ total}} = 10,5 \%$$

$$I_X + I_{eA} = I_{ci}$$

L'intensité d'émission des rayonnements X est donnée par le rendement de fluorescence.



$$IX = I_{ci} \times R_K$$

$$IX = 10,5 \times 0,75 = 7,9 \%$$

$$I_{eA} = I_{ci} - IX$$

$$I_{eA} = 10,5 - 7,9 = 2,6 \%$$

L'énergie des rayonnements X correspond à la différence des énergies de liaison, c'est-à-dire à l'énergie de liaison de la couche moins l'énergie de liaison de la couche L.

L'énergie des électrons Auger correspond à l'énergie de liaison de la couche moins deux fois l'énergie de liaison de la couche L.

$$EX = E_{I_K} \text{ technétium} - E_{I_L} \text{ technétium}$$

$$EX = 21,04 - 2,73 = 18,3 \text{ keV}$$

$$E_{eA_K} = E_{I_K} \text{ technétium} - 2 \times E_{I_L} \text{ technétium}$$

$$E_{eA_K} = 21,04 - 5,46 = 15,6 \text{ keV}$$

Enfin on peut considérer qu'il y a une émission d'électron Auger venant de la couche L

$$E_{eA_L} = E_{I_L} \text{ technétium} - 2 \times E_{I_M} \text{ technétium}$$

$$E_{eA_L} = 2,73 - 2 \times 0,5 = 1,7 \text{ keV}$$

L'intensité d'émission est celle de I_{ci4} soit 6,12 %.

4 Le tableau

Comme dans le cas des tables de données nous allons présenter les résultats dans un tableau en ordonnant les rayonnements par type, par énergie ou intensité d'émission.

| | Rayonnements | Energie en keV | Intensité d'émission en % |
|------------------------------------|--------------|----------------|---------------------------|
| Rayonnements Particulaires | β_2 | 1213 | 82 |
| | β_1 | 436 | 18 |
| | eci6 | 122 | 1 |
| | eci7 | 119 | 9,5 |
| | eci4 | 20 | 6,1 |
| | eAK | 15,6 | 2,6 |
| | eci5 | 3 | 86,5 |
| | eAL | 1,7 | 6,1 |
| Rayonnements Electromagnétiques | $I\gamma_1$ | 777 | 5,5 |
| | $I\gamma_2$ | 739 | 12,5 |
| | $I\gamma_3$ | 181 | 5,5 |
| | $I\gamma_7$ | 140 | 83,5 |
| | $I\gamma_4$ | 41 | 0,9 |
| | IX | 18,3 | 7,9 |

