

Estimation de la dose extrémité due à une contamination par un radionucléide émetteur β : l'équivalent de dose est-il un bon estimateur de la grandeur de protection ?

L. BOURGOIS¹

(Manuscrit reçu le 17 décembre 2010, accepté le 12 février 2011)

RÉSUMÉ

Lors de la manipulation de radionucléides émetteurs β , les mesures en termes d'équivalents de doses individuels sous 0,07 mm $H_p(0,07)$ sont utilisées pour les comparer à la valeur limite en dose équivalente à la peau ou aux extrémités donnée par la réglementation. Dans un premier temps, des expressions analytiques pour les équivalents de doses individuels sous 0,07 mm $H_p(0,07)$ et les doses équivalentes aux extrémités H_{peau} , dues au rayonnement β , sont données pour une source ponctuelle et une contamination surfacique sur la peau. Dans un second temps, les grandeurs opérationnelles et les grandeurs de protection sont comparées. Il est alors montré que dans le cas d'une source β , la grandeur opérationnelle surestime de façon trop importante la grandeur de protection. En effet, pour une contamination surfacique sur la peau le rapport entre la grandeur opérationnelle et la grandeur de protection est de 2 pour une énergie maximale d'un spectre β de 3 MeV et de 90 pour une énergie maximale d'un spectre β de 150 keV.

ABSTRACT

Skin dose estimation due to a contamination by a radionuclide β emitter: are doses equivalent good estimator of protection quantities?

When handling radioactive β emitters, measurements in terms of personal dose equivalents $H_p(0,07)$ are used to estimate the equivalent dose limit to skin or extremities given by regulations. First of all, analytical expressions for individual dose equivalents $H_p(0,07)$ and equivalent doses to the extremities H_{skin} are given for a point source and for contamination with a radionuclide β emitter. Second of all, operational quantities and protection quantities are compared. It is shown that in this case the operational quantities significantly overstate the protection quantities. For a skin contamination the ratio between operational quantities and protection quantities is 2 for a maximum β energy of 3 MeV and 90 for a maximum β energy of 150 keV.

Keywords: Beta particle / dose / skin / dose equivalent

Introduction

Lors de la manipulation de radionucléides émetteurs β , les équivalents de dose individuels sous 0,07 mm $H_p(0,07)$ mesurés peuvent être importants (Covens

¹ CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon, France.

et al., 2010 ; Bramoullé *et al.*, 2003). Ces mesures en termes de grandeur opérationnelle sont destinées à estimer la limite de dose pour les extrémités imposée par la réglementation, donnée dans la grandeur de protection, c'est-à-dire en dose équivalente aux extrémités : H_{peau} (article R4451-13 du Code du travail, directive européenne 1996). En principe la grandeur opérationnelle est supérieure à la grandeur de protection tout en étant proche de celle-ci, la surestimation est typiquement de 20 % ou plus (Paul, 2000). Néanmoins, lorsque l'on compare ces deux grandeurs pour les électrons (le lecteur pourra se référer à la figure 34 de l'ICRP, 1996) on remarque que la différence peut être importante notamment à basse énergie ; le rapport $H_p(0,07) / H_{\text{peau}}$ est de 1,8 pour des électrons monocinétiques de 3 MeV, 2 pour des électrons de 600 keV et 200 pour des électrons de 100 keV. À partir de ce constat, il était intéressant de faire une estimation du rapport entre l'estimateur et la grandeur de protection dans le cas des émetteurs β . Dans un premier temps, des expressions analytiques pour calculer les équivalents de dose et les doses équivalentes pour des sources ponctuelles et des contaminations surfaciques par un émetteur β au contact de la peau sont données. Dans un second temps, les différentes grandeurs seront comparées.

1. Matériel et méthode

1.1. Expression de la dose pour une source ponctuelle en fonction de la profondeur

Loevinger *et al.* (1956) ont proposé des expressions semi-expérimentales pour calculer la dose due à une source β ponctuelle dans un média semi-infini. Ces expressions, améliorées par Cross (1997), sont données dans l'équation (1). Elles donnent la dose (Gy) pour un rayonnement β à la profondeur x (g.cm^{-2}) dans un matériau homogène semi-infini.

$$D(x) = \begin{cases} \frac{k}{(\nu.x)^2} [C - \nu.x.\exp(1 - \nu.x/C) + \nu.x.\exp(1 - \nu.x) - A] & \text{si } x \leq C/\nu \\ \frac{k}{(\nu.x)^2} [\nu.x.\exp(1 - \nu.x) - A] & \text{si } C/\nu < x < R \\ 0 & \text{si } x > R \end{cases} \quad (1)$$

avec

$$\nu \text{ (cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}\text{)} = \frac{18,6}{(E_{\beta\text{Max}} - 0,036)^{1,37}} \text{ pour l'eau}$$

$$k \text{ (Gy)} = 1,6 \times 10^{-10} \frac{\nu^3 E_{\beta\text{moy}} \cdot \alpha}{4\pi\rho}$$

$$\alpha = \left(3C^2 - (C^2 - 1) \exp(1) - \left(1 + \nu R + \nu^2 R^2 \right) \exp(1 - \nu R) \right)^{-1}$$

$$C = \begin{cases} 1,349 - 0,416 \ln(E_{\text{max}}) & \text{pour les spectres simples} \\ 1,637 - 0,496 \ln(E_{\text{max}}) & \text{pour les spectres multi-composant} \\ 1,135 - 0,1086 \ln(E_{\text{max}}) - 0,0861(\ln E_{\text{max}})^2 & \text{pour les positrons} \end{cases}$$

$$A = \nu R \times \exp(1 - \nu R)$$

$$\bar{R} = 0,74 \times R_{\text{max}}$$

R_{max} est la portée maximale des électrons. Celle-ci pour des milieux léger – eau, tissus mous, aluminium... – est donnée par la formule de Katz et Penfold (1952).

$$R_{\text{max}} \text{ (g.cm}^{-2}\text{)} = 0,412 \cdot E_{\beta\text{max}}^{1,265 - 0,0954 \ln(E_{\beta\text{max}})} \quad 0,01 \leq E_{\beta\text{max}} \text{ (MeV)} \leq 2,5$$

$$R_{\text{max}} \text{ (g.cm}^{-2}\text{)} = 0,53 \cdot E_{\beta\text{max}} - 0,106 \quad 2,5 \leq E_{\beta\text{max}} \text{ (MeV)}$$

Les formulations de base étant données, les équivalents de dose individuels et les doses équivalentes à la peau pour des sources ponctuelles et des contaminations surfaciques sur la peau peuvent être alors calculés. Dans un premier temps, les expressions de Cross (1997) seront validées en les comparant à des résultats calculés par un code Monte-Carlo.

2. Résultats

2.1. Comparaison des formules analytiques avec un code Monte-Carlo

Les valeurs issues des calculs de l'équation (1) ont été comparées à des calculs réalisés à l'aide d'un code Monte-Carlo. La comparaison est effectuée pour quatre radionucléides : ^{18}F , ^{90}Y , ^{32}P et ^{10}Be .

Le code utilisé est un code de transport Monte-Carlo, MCNPX (Pelowitz, 2005), associé à la bibliothèque e1032. La grandeur calculée par le code MCNPX est l'énergie moyenne déposée dans une cellule (« tally de type *F6 »).

Les figures 1 à 4 comparent les résultats de la distribution de la dose d'une source β ponctuelle dans de les tissus obtenus par l'expression (1) avec ceux du code MCNPX (Pelowitz, 2005) pour 4 radionucléides : ^{18}F , ^{90}Y , ^{32}P et ^{10}Be .

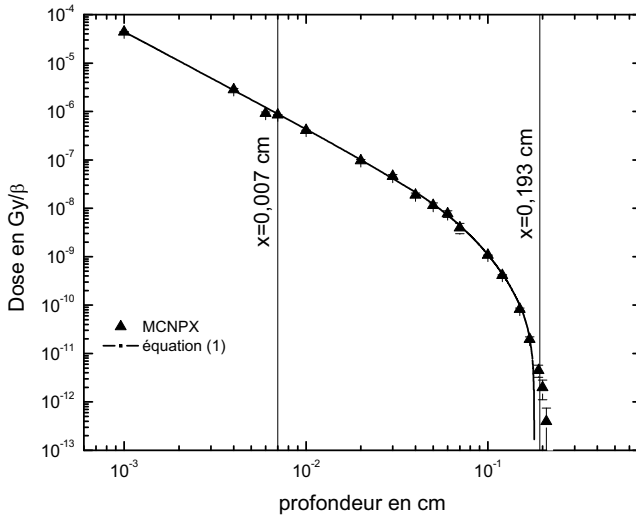


Figure 1 – Comparaison des doses β en fonction de la profondeur de tissus dues au ^{18}F calculées par l'expression analytique (1) et par le code Monte-Carlo MCNPX.

β doses comparison depending on the depth of tissue due to ^{18}F calculated by the analytical expression (1) and by Monte-Carlo code MCNPX.

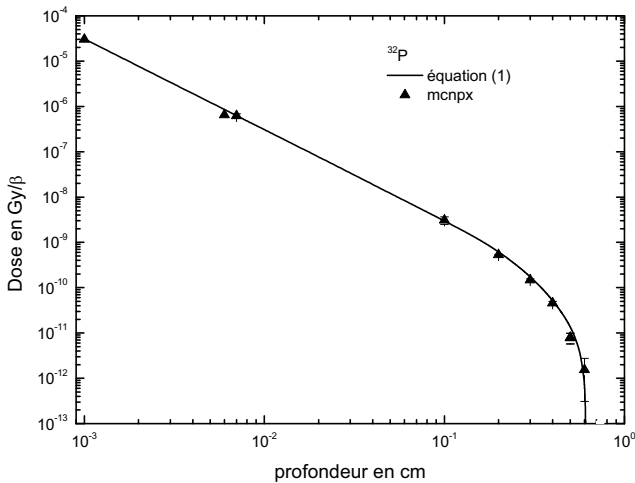


Figure 2 – Comparaison des doses β en fonction de la profondeur de tissus dues au ^{32}P calculées par l'expression analytique (1) et par le code Monte-Carlo MCNPX.

β doses comparison depending on the depth of tissue due to ^{32}P calculated by the analytical expression (1) and by Monte-Carlo code MCNPX.

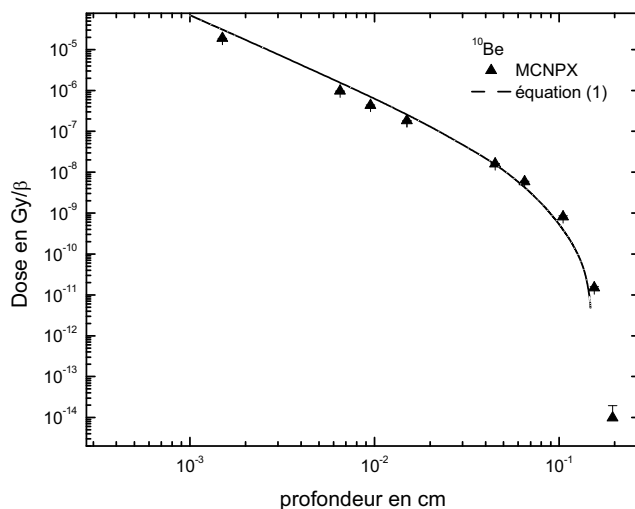


Figure 3 – Comparaison des doses β en fonction de la profondeur de tissus dues au ^{10}Be calculées par l'expression analytique (1) et par le code Monte-Carlo MCNPX.
 β doses comparison depending on the depth of tissue due to ^{9}Be calculated by the analytical expression (1) and by Monte-Carlo code MCNPX.

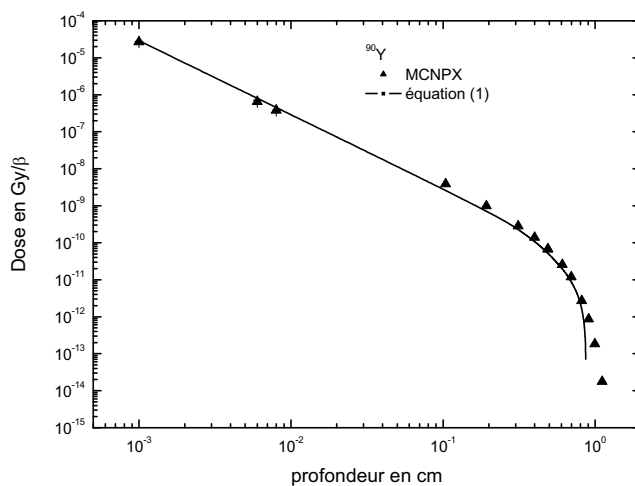


Figure 4 – Comparaison des doses β en fonction de la profondeur de tissus dues au ^{90}Y calculées par l'expression analytique (1) et par le code Monte-Carlo MCNPX.
 β doses comparison depending on the depth of tissue due to ^{90}Y calculated by the analytical expression (1) and by Monte-Carlo code MCNPX.

Il faut noter que l'expression (1), bien que semi-empirique, donne une très bonne approximation de la dose β en fonction de la profondeur. En effet pour :

- le ^{18}F le rapport entre la valeur issue de (1) et le code MCNPX est inférieur à 15 % jusqu'à une profondeur de 0,17 cm, au-delà l'expression (1) s'annule alors que les valeurs calculées par MCNPX s'annule pour une profondeur de 0,23 cm,
- pour le ^{32}P le rapport entre la valeur issue de (1) et MCNPX est inférieur à 30 % jusqu'à une profondeur de 0,6 cm au-delà l'expression (1) s'annule alors que les valeurs calculées par MCNPX s'annule pour une profondeur de 0,79 cm,
- pour le ^{10}Be le rapport entre la valeur issue de (1) et MCNPX est inférieur à 50 % jusqu'à une profondeur de 0,15 cm, au-delà l'expression (1) s'annule alors que les valeurs calculées par MCNPX s'annule pour une profondeur de 0,19 cm,
- pour le ^{90}Y le rapport entre la valeur issue de (1) et MCNPX est inférieur à 50 % jusqu'à une profondeur de 0,8 cm, au-delà l'expression (1) s'annule alors que les valeurs calculées par MCNPX s'annule pour une profondeur de 1,1 cm.

2.2. Calcul de l'exposition externe en profondeur due à une contamination surfacique sur la peau par un émetteur β

On se propose d'estimer la dose en fonction de la profondeur due une contamination surfacique de la peau de $1 \beta \cdot \text{cm}^{-2}$.

La figure 5 représente la géométrie de calcul. La contamination surfacique est répartie uniformément sur la peau. On se propose d'estimer la dose à une profondeur d de la surface de la peau. Au-delà d'une distance R , représentant la portée maximale des électrons la dose est nulle. Ainsi la zone d'intérêt pour le calcul peut être définie par un disque de rayon égal à $\sqrt{R^2 - d^2}$ (voir Fig. 5). Par la méthode classique de calcul du point kernel, la dose due à la contamination β est donnée dans l'expression (2).

$$D_{\text{disque}}(d) = \iint_{dS} D(\rho) dS = 2\pi \int_d^R \rho D(\rho) d\rho \quad (2)$$

avec $D(\rho)$ donnée par l'expression (1) avec ses paramètres décrits.

L'expression (3) donne la dose en Gy par $\beta \cdot \text{cm}^{-2}$ à une profondeur d , due à une contamination surfacique sur la peau par un émetteur β .

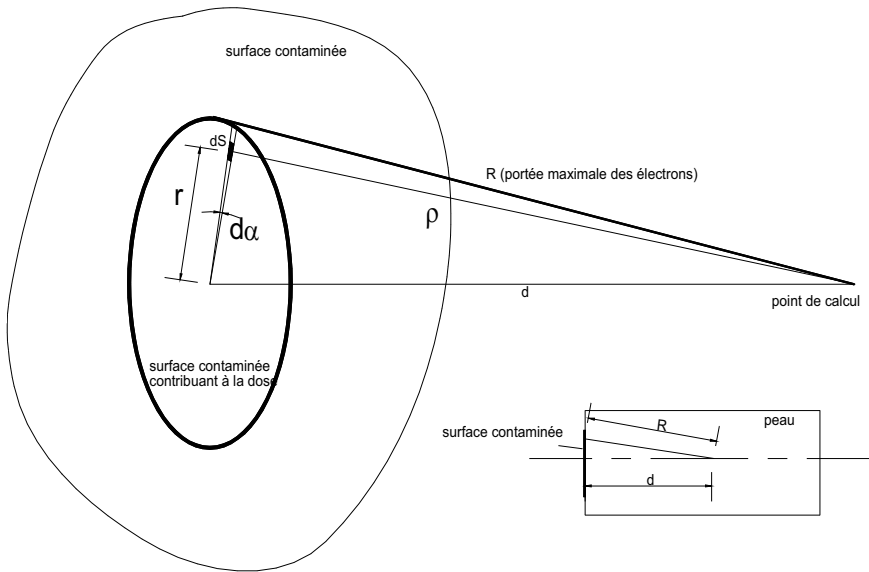


Figure 5 – Géométrie pour le calcul de la dose en profondeur due à une contamination surfacique sur la peau.

Geometry for calculating the dose in depth due to a skin surface contamination.

$$D_{\text{disque}}(d) = \begin{cases} \frac{2\pi k}{v^2} \left[C \left[1 - \exp\left(1 - v \cdot d / C\right) - \ln\left(v \cdot d / C\right) \right] + \exp(1 - v \cdot d) - \exp(1 - v \cdot R) \right] - A \times \ln(R/d) & \text{si } d \leq C/v \\ \frac{2\pi k}{v^2} \left[\exp(1 - v \cdot d) - \exp(1 - v \cdot R) - A \times \ln(R/d) \right] & \text{si } C/v < d < R \\ 0 & \text{si } d > R \end{cases} \quad (3)$$

Il est à noter que les paramètres utilisés dans l'équation (3) sont identiques à ceux explicités dans l'équation (1).

2.3. Calcul de l'équivalent de dose $H_p(0,07)$ pour une source ponctuelle sur la peau

On se propose d'estimer l'exposition externe d'une source ponctuelle mise en contact avec la peau.

Pour calculer l'équivalent de dose individuel $H_p(0,07)$, en Sv par β , émis pour une source ponctuelle sur la peau, il convient de calculer la dose pour $x = 7 \times 10^{-3}$ cm dans l'expression (1). À noter que dans le cas des électrons les valeurs de la dose et de l'équivalent de dose sont numériquement identiques (Dietze et Alberts, 2004).

2.4. Calcul de l'équivalent de dose individuel $H_p(0,07)$ pour une contamination surfacique β sur la peau

On se propose d'estimer l'exposition externe d'une source surfacique β mise en contact avec la peau.

Pour calculer l'équivalent de dose individuel $H_p(0,07)$, en Sv par $\beta \cdot \text{cm}^{-2}$, pour une contamination surfacique β sur la peau, il convient de calculer la dose pour $d = 7 \times 10^{-3}$ cm dans l'expression (3). À noter que dans le cas des électrons, les valeurs de la dose et de l'équivalent de dose sont numériquement identiques (Dietze et Alberts, 2004).

2.5. Calcul de la dose équivalente à la peau H_{peau} pour une source ponctuelle β sur la peau

Pour le calcul de la dose équivalente à la peau le fantôme de Schultz et Zoetelief (1996) décrit dans l'ICRP (1996) a été considéré. Ainsi pour calculer la dose équivalente à la peau, il suffit de calculer la dose moyenne entre une profondeur de 70 μm et 1,93 mm de tissus. La dose équivalente à la peau (Sv pour un β émis) est alors donnée par le calcul de l'expression (4).

$$H_{\text{peau}} = \frac{W_R}{0,193 - 0,007} \int_{0,007}^{0,193} D(x) dx \quad (4)$$

avec $D(x)$ donnée par l'expression (1) et $W_R = 1$ (CIPR, 1990).

La dose équivalente à la peau (en Sv pour un β émis) pour une source β ponctuelle sur la peau est donnée par l'expression (5).

$$H_{\text{peau}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{k}{(0,193 - 0,007) \times v^2} \left[\begin{array}{l} -v - v \times e^1 \times E_i(-1) + \frac{C}{0,007} + v \times e^1 \times E_i\left(-\frac{v \times 0,007}{C}\right) \\ -v \times e^1 \times E_i(-v \times 0,007) - \frac{A}{0,007} + v \times e^1 \times \text{Ln}(\text{Max}) \\ + v \times e^1 \times E_i(-v \times \text{Max}) + \frac{A}{\text{Max}} - v \times e^1 \times \text{Ln}\left(\frac{C}{v}\right) \end{array} \right] \\ \text{si } 0,007 \leq C/v \\ \\ \frac{k}{(0,193 - 0,007) \times v^2} \left[\begin{array}{l} v \times e^1 \times \text{Ln}(\text{Max}) + v \times e^1 \times E_i(-v \times \text{Max}) + \frac{A}{\text{Max}} \\ -v \times e^1 \times \text{Ln}\left(\frac{C}{v}\right) - v \times e^1 \times E_i(-C) - \frac{A \times C}{v} \end{array} \right] \\ \text{si } C/v < 0,007 < R \\ \\ E_i(a) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{a^i}{i \times i!} \\ \\ \text{Max} = R \text{ si } R < 0,193 \text{ sinon Max} = 0,193 \end{array} \right. \quad (5)$$

Il est à noter que les paramètres utilisés dans l'équation (5) sont identiques à ceux explicités dans l'équation (1).

2.6. Calcul de la dose équivalente à la peau H_{peau} pour une contamination surfacique par un émetteur β sur la peau

Pour le calcul de la dose équivalente à la peau le fantôme de Schultz et Zoetelief (1996) décrit dans l'ICRP (1996) a été considéré. Ainsi, pour calculer la dose équivalente à la peau il suffit de calculer la dose moyenne entre une profondeur de 70 μm et 1,93 mm de tissus mous. La dose équivalente à la peau, due à une contamination surfacique est alors donnée par le calcul de l'expression (4) avec $D(x)$ donné par les expressions (3) et $W_R = 1$ (CIPR, 1990).

La dose équivalente à la peau pour une contamination surfacique β sur la peau (en Sv par $\beta \cdot \text{cm}^{-2}$) est alors donnée par l'expression (6).

$$H_{\text{peau}} = \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{2 \times \pi \times k}{(0,193 - 0,007) \times \nu^2} \left[\begin{array}{l} \frac{2 \times C^2}{\nu} + \frac{C}{\nu} - C \times 0,007 - \frac{C^2}{\nu} \times \exp\left(1 - \frac{\nu \times 0,007}{C}\right) + 0,007 \times \text{Ln}\left(\frac{\nu \times 0,007}{C}\right) \\ - 0,007 + \frac{1}{\nu} \times \exp(1 - \nu \times 0,007) + 0,007 \times \exp(1 - \nu \times R) \\ + A \times 0,007 \times \text{Ln}\left(\frac{R}{0,007}\right) + A \times 0,007 - \frac{1}{\nu} \times \exp(1 - \nu \times \text{Max}) \\ - \text{Max} \times \exp(1 - \nu \times R) - A \times \text{Max} \times \text{Ln}\left(\frac{R}{\text{Max}}\right) - A \times \text{Max} \end{array} \right] \right. \\ \left. \text{si } 0,007 \leq C/\nu \right. \quad (6) \\ \\ \left[\begin{array}{l} -\frac{1}{\nu} \times \exp(1 - \nu \times \text{Max}) - \text{Max} \times \exp(1 - \nu \times R) - A \times \text{Max} \times \text{Ln}\left(\frac{R}{\text{Max}}\right) \\ - A \times \text{Max} + \frac{1}{\nu} \times \exp(1 - \nu \times 0,007) + 0,007 \times \exp(1 - \nu \times R) \\ + A \times 0,007 \times \text{Ln}\left(\frac{R}{0,007}\right) + A \times 0,007 \end{array} \right] \\ \left. \text{si } C/\nu < 0,007 < R \right. \\ \\ \text{Max} = R \text{ si } R < 0,193 \text{ sinon } \text{Max} = 0,193 \end{array} \right.$$

3. Discussion

Dès lors que les expressions analytiques sont définies, il était intéressant de comparer la grandeur de protection avec sa grandeur opérationnelle. La figure 6 donne le rapport entre l'équivalent de dose individuel sous 0,07 mm et la dose équivalente à la peau pour une contamination surfacique β^- à spectre simple en fonction de l'énergie maximale des β . Il faut noter que ce rapport est indépendant de l'énergie moyenne des β . Il est constaté que le rapport peut aller de 2 pour des énergies de 3 MeV à 100 pour des spectres d'énergie maximale de 100 keV.

Les résultats de débit d'équivalent de dose et de débit de dose équivalent pour différents radionucléides (^{18}F , ^{90}Y , ^{32}P , ^{10}Be) pour une source ponctuelle de un Bq sont donnés dans le tableau 1 et dans le tableau 2 pour une contamination surfacique de 1 Bq.cm⁻². À noter que les résultats ne prennent en compte que les émissions β des différents radionucléides. Les doses dues aux photons sont négligeables par rapport aux doses β dans ce type de configuration.

On remarque que la grandeur opérationnelle surestime toujours la grandeur de protection ce qui va dans le sens de la protection. Néanmoins, le rapport entre la grandeur de protection et la grandeur opérationnelle est important. Pour une source ponctuelle sur la peau, ce rapport est de l'ordre de 30 pour des sources de haute

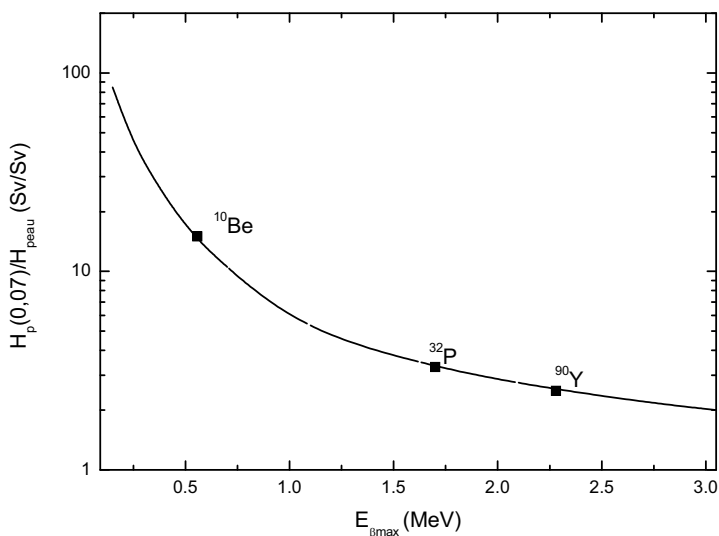


Figure 6 – Rapport entre l'équivalent de dose individuel sous 0,07 mm et la dose équivalente à la peau pour une contamination surfacique β^- en fonction de l'énergie maximale des β^- .

Ratio between personal dose equivalent $H_p(0,07)$ and equivalent dose to skin for a β surface contamination function of the β maximum energy.

TABLEAU I

Débits d'équivalent de dose et débit de dose équivalent pour une source ponctuelle de 1 Bq sur la peau pour différents radionucléides (seules les émissions β sont prises en compte).

Equivalent dose rates and dose equivalent rate for a point source of 1 Bq for different radionuclides (only β emissions are taken into account).

Radionucléide	$H_p(0,07)$ (Sv/h/Bq)	H_{peau} (Sv/h/Bq)	$H_p(0,07)/H_{peau}$
^{18}F	$4,3 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-4}$	41
^{90}Y	2×10^{-3}	$7,3 \times 10^{-5}$	28
^{32}P	$2,4 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-5}$	28
^{10}Be	5×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-4}$	35

énergie (^{90}Y d'énergie maximale 2,28 MeV ou ^{32}P d'énergie maximale 1,7 MeV) et plus de 35 pour des sources d'énergie moindre (^{18}F d'énergie maximale 0,633 MeV ou ^{10}Be d'énergie maximale 0,556 MeV). Pour une contamination surfacique on observe des surestimations de la grandeur de protection par la grandeur opérationnelle de 2,5 (pour ^{90}Y) à 15 (pour ^{10}Be).

TABLEAU II

Débit d'équivalent de dose individuel et débit de dose équivalents pour une contamination surfacique de 1 Bq.cm² sur la peau pour différents radionucléides (seules les émissions β sont prises en compte).

Equivalent dose rates and dose equivalent rate for a surface contamination of 1 Bq.cm² for different radionuclides (only β emissions are taken into account).

radionucléide	$H_p(0,07)$ (Sv/h/Bq/cm ²)	H_{peau} (Sv/h/Bq/cm ²)	$H_p(0,07)/H_{\text{peau}}$
¹⁸ F	$2,2 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-7}$	9
⁹⁰ Y	$2,5 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	2,5
³² P	$2,6 \times 10^{-6}$	$7,8 \times 10^{-7}$	3,3
¹⁰ Be	$2,5 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-7}$	15

Ceci s'explique parfaitement par la manière de calculer la dose équivalente à la peau proposée par l'ICRP (1996). En effet le calcul de la dose équivalente à la peau c'est-à-dire la dose moyenne entre 0,007 cm et 0,193 cm serait de l'ordre de l'équivalent de dose sous une épaisseur de tissus de 0,007 cm si la dose entre 0,007 cm et 0,193 cm de tissus était constante. Or, de part l'atténuation des électrons par les tissus, celle-ci varie de façon colossale comme cela est illustré, par exemple, par la figure 1.

4. Conclusion

L'évaluation des doses en fonction de la profondeur de tissus, des doses équivalentes et des équivalents de dose pour des sources ponctuelles ou des contaminations surfaciques β sur la peau peut être effectuée par des expressions analytiques relativement simples.

On remarque que si la grandeur opérationnelle surestime toujours la grandeur de protection, le rapport entre celles-ci est trop important pour en être un estimateur correct. Il est constaté que ce rapport peut aller de 2 pour des spectres d'énergie maximale de 3 MeV à 90 pour des spectres d'énergie maximale de 150 keV.

Aussi, lorsque, pour un opérateur, classé radiologiquement, exposé par une contamination surfacique de ¹⁸F sur la peau, il est mesuré sur une bague dosimètre un équivalent de dose sous 0,07 mm de tissus une valeur de 501 mSv, a-t-on réellement dépassé les limites réglementaires ? En effet, en terme de dose équivalente à la peau, l'estimation serait proche de 50 mSv, soit la limite réglementaire pour le public.

Ainsi, pour ce qui concerne la problématique des rayonnements β , il semble difficile de concilier les limites de dose fixées par la réglementation en terme de dose équivalente à la peau avec une estimation par la grandeur opérationnelle la dose équivalente sous 0,07 mm : $H_p(0,07)$.

RÉFÉRENCES

- Bramoullé C. Prunier C. Mantzarides M., Guilloteau D., Baulieu J.L., Besnard J.C., Bastie A.M., Lavocat-Discherel C. (2003) Radioprotection du personnel lors de traitement par OctreoTher™ : produit utilisant l'yttrium-90, *Radioprotection* **38** (3), 367-375.
- CIPR publication 60 (1990) Recommandations 1990 de la Commission internationale de protection radiologique, Pergamon Press, ISBN 0 08 042275 6.
- Covens P., Berus D., Vanhavere F., Caveliers V. (2010) The introduction of automated dispensing and injection during PET procedures: a step in the optimisation of extremity doses and whole-body doses of nuclear medicine staff, *Radiat. Prot. Dosim.* **140** (3), 250-258.
- Cross W.G. (1997) Empirical expression for beta ray point source dose distributions, *Radiat. Prot. Dosim.* **69** (2), 85-96.
- Dietze G., Alberts W.G. (2004) Why it is advisable to keep $W_R=1$ and $Q=1$ for photons and electrons, *Radiat. Prot. Dosim.* **109** (4), 297-302.
- Directive européenne (1996) Directive 96/29/euratom du conseil, du 13 mai 1996, fixant les normes de bases relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, ISSN 0378-7060.
- ICRP publication 74 (1996) Coefficients for use in radiological protection against external radiation, *Ann.* **26** (3/4).
- Katz L., Penfold A.S. (1952) Range energy relations for electrons and the determination on beta-ray end point energies by absorption, *Rev. Mod. Phys.* **24** (1), 28-44.
- Loevinger R., Japha E.M., Brownell G. (1956) Discrete radioisotope sources. In: *Radiation Dosimetry* (Hine G.J., Brownell G.L., Eds) pp. 693-799. Academic Press, New York.
- Paul D. (2000) Grandeurs de protection en dosimétrie externe, *Radioprotection* **35** (4), 457-471.
- Pelowitz D.B. (2005) MCNPX User's S MANUAL version 2.5.0 LA-CP-05-0369.
- Schultz F.W., Zoetelief J. (1996) Organ and effective doses in the male phantom Adam exposed in AP direction to broad unidirectional beams of monoenergetic electrons, *Health Phys.* **70** (4).