



# Empfehlung betreffend der Verwendung von Umrechnungsfaktoren $h^*(10)$ für die Messung der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung $\dot{H}^*(10)$ mittels in situ Gammaskpektrometrie

## 1. Einleitung

Die in situ Gammaskpektrometrie ist eine Messmethode zur Bestimmung der Radioaktivität in der Umgebung. Die Methode erlaubt es, die an einem Messort vorhandenen Radionuklide zu identifizieren, ihre mittlere Aktivität abzuschätzen und die damit verbundene Umgebungs-Äquivalentdosisleistung zu berechnen. Die Bestimmung der Aktivität der Radionuklide im Boden basiert auf der Methode, die im ICRU-53 Report [1] beschrieben wird. Die Umrechnung der Bodenaktivität in eine Umgebungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}^*(10)$  in einer Höhe von 1 m ab Boden ist allerdings nicht trivial. Tatsache ist, dass sich die Aktivität einer Quelle im Boden zwar relativ einfach auf Grund der Zählrate in den Emissionspeaks berechnen lässt, zur Berechnung der Umgebungs-Äquivalentdosisleistung ist aber auch die Berücksichtigung der Streustrahlung wichtig, welche sich sehr schwierig rein auf Grund des Spektrums ableiten lässt.

## 2. Berechnungsmethoden für Konversionsfaktoren $h^*(10)$

### 2.1. Studie von Lemercier et al.

Die Anwendung von Monte-Carlo-Methoden auf den Strahlungstransport ist gut geeignet für die Abschätzung des Beitrags der Streustrahlung. In der Praxis kann aber die Verteilung der Aktivität im Boden eine starke Variabilität aufweisen und die Bodenfläche, welche berücksichtigt werden muss, ist sehr gross (typischerweise ist ein Radius von mehreren hundert Metern um den Messort herum zu berücksichtigen). Dies würde zu unrealistischen grossen Rechenzeiten führen. Daher wird üblicherweise für die Simulation in der Ebene von einer invarianten Aktivitätsverteilung ausgegangen und für die Verteilung im Boden werden drei Modelle angesetzt, nämlich einer Aktivität ausschliesslich auf der Oberfläche ohne Eindringen in den Boden ( $\beta = 0$ ), von einer exponentiellen Abnahme der Aktivität im Boden ( $\beta > 0$ ) und von einer homogenen Aktivitätsverteilung ( $\beta = \infty$ ) im Boden. Ausgehend von diesen Annahmen haben Lemercier et al. [2] die Umrechnungsfaktoren  $h^*(10)$  zwischen Bodenaktivität und Umgebungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}^*(10)$  mit Hilfe des Geant 3 Monte-Carlo-Codes ermittelt. Die Studie von Lemercier et al. [2] liefert dabei die Umrechnungsfaktoren für monoenergetische Emissionslinien zwischen 50 und 2500 keV für verschiedene (exponentielle) Aktivitätsverteilungen im Boden ( $0 \leq \beta \leq \infty$ ).

## **2.2. Validierung der Arbeit von Lemerrier et al.**

Im Rahmen einer durch das IRA durchgeführten Studie wurden die Umrechnungsfaktoren  $h^*(10)$  für monoenergetische Emissionslinien mit Hilfe des Programms Geant 4 unter ansonsten identischen Bedingungen und Annahmen wie bei Lemerrier neu berechnet. Der Vorteil der Version 4 von Geant liegt in der besseren Modellierung des Strahlungstransportes insbesondere betreffend der Einflüsse der Ionisation in einem weniger dichten Medium wie Luft. Die Resultate der Neuberechnung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (weniger als etwa 5 % Abweichung) zwischen Geant 3 und 4 für Photonenenergien im Bereich zwischen 200 und 1500 keV. Für hohe Energien (>1500 keV) sind Unterschiede kleiner als 10 % zwischen den beiden Geant-Versionen zu beobachten. Für tiefe Energien (< 200 keV) hingegen können sich die Resultate der beiden Versionen je nach Verteilung der Aktivität im Boden im Extremfall um mehr als 60 % unterscheiden.

## **2.3. Nuklidspezifische Umrechnungsfaktoren $h^*(10)$**

Der für ein Radionuklid spezifische Umrechnungsfaktor ist die Summe aller Umrechnungsfaktoren für die monoenergetischen Emissionslinien, welche das Nuklid emittiert, gewichtet mit der Gamma-Emissionswahrscheinlichkeit. Im Fall einer Zerfallsreihe ist der gesamte Umrechnungsfaktor unter der Voraussetzung eines Gleichgewichtszustandes die Summe aller Umrechnungsfaktoren der zur Zerfallsreihe beitragenden Radionuklide (unter Berücksichtigung der Branching Ratio). Die Arbeit von Lemerrier et al. schlägt Umrechnungsfaktoren für  $^{40}\text{K}$  und  $^{137}\text{Cs}$  sowie für die Zerfallsreihen von  $^{232}\text{Th}$  und  $^{238}\text{U}$  vor, aber ausschliesslich für eine homogene Aktivitätsverteilung der Nuklide im Boden.

## **3. Empfehlungen**

Die Expertengruppe für Dosimetrie im Strahlenschutz empfiehlt, dass die Umrechnungsfaktoren  $h^*(10)$  für die wichtigen Radionuklide auf Grund der von Lemerrier et al. publizierten monoenergetischen Umrechnungsfaktoren (50, 100, 200, 500, 662, 750, 1000, 1250, 1460, 2250 und 2500 keV) berechnet werden. Für die tatsächlich vorliegenden Energien der Emissionslinien können die Umrechnungsfaktoren mit Hilfe einer Interpolation (Spline-Interpolation) berechnet werden. Für jedes Radionuklid werden die Umrechnungsfaktoren für die folgenden Aktivitätsverteilungen im Boden ermittelt:  $\beta = 0, 0.3, 1, 5, 10, 20, 50$  und  $\infty$ . Daneben müssen aber die Untersuchungen zur Analyse der Abweichungen zwischen den Programmversionen Geant 3 und Geant 4 insbesondere für tiefe Energien (<200 keV), aber auch für hohe Energien über 1500 keV fortgesetzt werden. Dafür empfiehlt die Expertengruppe die Verwendung der Zerfallsdaten der Radionuklide (Gamma-Emissionswahrscheinlichkeiten und Branching Ratio) der Monographie No. 5 des Bureau International des Poids et Mesures BIPM [3] respektive die neu erschienene Publikation 107 der ICRP [4]. In Tabelle 1 sind die Umrechnungsfaktoren für verschiedene Radionuklide und Verteilungen der Aktivität im Boden, wie sie durch den Faktor  $\beta$  charakterisiert wird, angegeben.

## Referenzen

- [1] ICRU Report 53, International Commission on Radiation Units and Measurements, *Gamma-Ray Spectrometry in the Environment*, Bethesda (USA), 1995.
- [2] M. Lemercier, R. Gurriaran, P. Bouisset, X. Cagnat , Specific activity to H\*(10) conversion coefficients for in situ gamma spectrometry, *Radiat. Protect. Dosim.* 2008 128(1):83-89.
- [3] Monographie BIPM 5, *Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2004, 2006 und 2008, über Internet zugänglich unter <http://www.bipm.org/en/publications/monographie-ri-5.html>
- [4] ICRP Publication 107, International Commission on Radiological Protection, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, Elsevier, Oxford, 2009.

Tabelle 1: Umrechnungsfaktoren  $h^*(10)$  von der Bodenaktivität zur Umgebungs-Äquivalentdosisleistung  $\dot{H}(10)$  für verschiedene Radionuklide.

Radionuklide	Umrechnungsfaktor $h^*(10)$								(nSv/h)/ Bq Punkt- quelle	
	(nSv/h)/ (Bq/kg) Homogène ( $\beta \rightarrow \infty$ )	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=50$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=20$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=10$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=5$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=1$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=0.3$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=0$		
Natürliche Radionuklide resp. Zerfallsketten	<sup>232</sup> Th (total)	$7.94 \cdot 10^{-1}$	$1.25 \cdot 10^{-3}$	$2.37 \cdot 10^{-3}$	$3.51 \cdot 10^{-3}$	$4.80 \cdot 10^{-3}$	$7.79 \cdot 10^{-3}$	$9.73 \cdot 10^{-3}$	$1.19 \cdot 10^{-2}$	$3.49 \cdot 10^{-4}$
	<sup>208</sup> Tl	$1.12 \cdot 10^0$	$1.71 \cdot 10^{-3}$	$3.16 \cdot 10^{-3}$	$4.57 \cdot 10^{-3}$	$6.14 \cdot 10^{-3}$	$9.79 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$1.48 \cdot 10^{-2}$	$4.18 \cdot 10^{-4}$
	<sup>228</sup> Ac <sup>1</sup>	$3.06 \cdot 10^{-1}$	$4.93 \cdot 10^{-4}$	$9.47 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$1.97 \cdot 10^{-3}$	$3.23 \cdot 10^{-3}$	$4.04 \cdot 10^{-3}$	$4.99 \cdot 10^{-3}$	$1.50 \cdot 10^{-4}$
	<sup>212</sup> Pb	$4.52 \cdot 10^{-2}$	$7.84 \cdot 10^{-5}$	$1.61 \cdot 10^{-4}$	$2.54 \cdot 10^{-4}$	$3.63 \cdot 10^{-4}$	$6.23 \cdot 10^{-4}$	$7.79 \cdot 10^{-4}$	$9.81 \cdot 10^{-4}$	$2.89 \cdot 10^{-5}$
	<sup>212</sup> Bi	$3.41 \cdot 10^{-2}$	$5.51 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$	$2.17 \cdot 10^{-4}$	$3.48 \cdot 10^{-4}$	$4.38 \cdot 10^{-4}$	$5.42 \cdot 10^{-4}$	$1.71 \cdot 10^{-5}$
	<sup>224</sup> Ra	$3.44 \cdot 10^{-3}$	$5.90 \cdot 10^{-6}$	$1.20 \cdot 10^{-5}$	$1.87 \cdot 10^{-5}$	$2.61 \cdot 10^{-5}$	$4.33 \cdot 10^{-5}$	$5.36 \cdot 10^{-5}$	$6.65 \cdot 10^{-5}$	$1.87 \cdot 10^{-6}$
	<sup>238</sup> U (total)	$5.53 \cdot 10^{-1}$	$8.86 \cdot 10^{-4}$	$1.70 \cdot 10^{-3}$	$2.53 \cdot 10^{-3}$	$3.47 \cdot 10^{-3}$	$5.61 \cdot 10^{-3}$	$6.92 \cdot 10^{-3}$	$8.45 \cdot 10^{-3}$	$2.46 \cdot 10^{-4}$
	<sup>214</sup> Bi	$4.72 \cdot 10^{-1}$	$7.47 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$2.10 \cdot 10^{-3}$	$2.86 \cdot 10^{-3}$	$4.60 \cdot 10^{-3}$	$5.67 \cdot 10^{-3}$	$6.89 \cdot 10^{-3}$	$2.00 \cdot 10^{-4}$
	<sup>214</sup> Pb	$7.90 \cdot 10^{-2}$	$1.35 \cdot 10^{-4}$	$2.71 \cdot 10^{-4}$	$4.18 \cdot 10^{-4}$	$5.90 \cdot 10^{-4}$	$9.78 \cdot 10^{-4}$	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$1.51 \cdot 10^{-3}$	$4.43 \cdot 10^{-5}$
	<sup>226</sup> Ra	$2.26 \cdot 10^{-3}$	$3.96 \cdot 10^{-6}$	$8.09 \cdot 10^{-6}$	$1.29 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-5}$	$3.11 \cdot 10^{-5}$	$3.93 \cdot 10^{-5}$	$4.88 \cdot 10^{-5}$	$1.45 \cdot 10^{-6}$
	<sup>7</sup> Be	$1.70 \cdot 10^{-2}$	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$5.63 \cdot 10^{-5}$	$8.59 \cdot 10^{-5}$	$1.19 \cdot 10^{-4}$	$1.94 \cdot 10^{-4}$	$2.37 \cdot 10^{-4}$	$2.93 \cdot 10^{-4}$	$8.40 \cdot 10^{-6}$
	<sup>40</sup> K <sup>1</sup>	$5.17 \cdot 10^{-2}$	$8.06 \cdot 10^{-5}$	$1.51 \cdot 10^{-4}$	$2.22 \cdot 10^{-4}$	$2.98 \cdot 10^{-4}$	$4.88 \cdot 10^{-4}$	$5.92 \cdot 10^{-4}$	$7.27 \cdot 10^{-4}$	$2.12 \cdot 10^{-5}$
Künstliche Radionuklide	<sup>51</sup> Cr	$1.08 \cdot 10^{-2}$	$1.84 \cdot 10^{-5}$	$3.70 \cdot 10^{-5}$	$5.68 \cdot 10^{-5}$	$7.94 \cdot 10^{-5}$	$1.29 \cdot 10^{-4}$	$1.58 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$	$5.45 \cdot 10^{-6}$
	<sup>54</sup> Mn	$2.83 \cdot 10^{-1}$	$4.56 \cdot 10^{-4}$	$8.76 \cdot 10^{-4}$	$1.31 \cdot 10^{-3}$	$1.81 \cdot 10^{-3}$	$2.88 \cdot 10^{-3}$	$3.64 \cdot 10^{-3}$	$4.42 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-4}$
	<sup>57</sup> Co	$3.33 \cdot 10^{-2}$	$6.09 \cdot 10^{-5}$	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$2.06 \cdot 10^{-4}$	$3.03 \cdot 10^{-4}$	$5.16 \cdot 10^{-4}$	$6.41 \cdot 10^{-4}$	$7.94 \cdot 10^{-4}$	$2.27 \cdot 10^{-5}$
	<sup>58</sup> Co <sup>1</sup>	$3.29 \cdot 10^{-1}$	$5.36 \cdot 10^{-4}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$1.56 \cdot 10^{-3}$	$2.14 \cdot 10^{-3}$	$3.43 \cdot 10^{-3}$	$4.32 \cdot 10^{-3}$	$5.27 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$
	<sup>60</sup> Co	$8.25 \cdot 10^{-1}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$	$2.50 \cdot 10^{-3}$	$3.65 \cdot 10^{-3}$	$4.96 \cdot 10^{-3}$	$8.08 \cdot 10^{-3}$	$9.92 \cdot 10^{-3}$	$1.21 \cdot 10^{-2}$	$3.54 \cdot 10^{-4}$
	<sup>59</sup> Fe	$3.92 \cdot 10^{-1}$	$6.21 \cdot 10^{-4}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$	$1.75 \cdot 10^{-3}$	$2.38 \cdot 10^{-3}$	$3.88 \cdot 10^{-3}$	$4.78 \cdot 10^{-3}$	$5.82 \cdot 10^{-3}$	$1.71 \cdot 10^{-4}$
	<sup>65</sup> Zn	$1.89 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-4}$	$5.84 \cdot 10^{-4}$	$8.57 \cdot 10^{-4}$	$1.17 \cdot 10^{-3}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$	$2.36 \cdot 10^{-3}$	$2.87 \cdot 10^{-3}$	$8.41 \cdot 10^{-5}$
	<sup>95</sup> Zr <sup>1</sup>	$2.48 \cdot 10^{-1}$	$4.07 \cdot 10^{-4}$	$7.93 \cdot 10^{-4}$	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$3.32 \cdot 10^{-3}$	$4.01 \cdot 10^{-3}$	$1.18 \cdot 10^{-4}$
	<sup>95</sup> Nb <sup>1</sup>	$2.58 \cdot 10^{-1}$	$4.22 \cdot 10^{-4}$	$8.19 \cdot 10^{-4}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$1.69 \cdot 10^{-3}$	$2.69 \cdot 10^{-3}$	$3.42 \cdot 10^{-3}$	$4.15 \cdot 10^{-3}$	$1.21 \cdot 10^{-4}$
	<sup>99m</sup> Tc	$3.63 \cdot 10^{-2}$	$6.60 \cdot 10^{-5}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$	$2.20 \cdot 10^{-4}$	$3.20 \cdot 10^{-4}$	$5.39 \cdot 10^{-4}$	$6.70 \cdot 10^{-4}$	$8.35 \cdot 10^{-4}$	$2.35 \cdot 10^{-5}$
	<sup>110m</sup> Ag	$9.24 \cdot 10^{-1}$	$1.49 \cdot 10^{-3}$	$2.87 \cdot 10^{-3}$	$4.28 \cdot 10^{-3}$	$5.88 \cdot 10^{-3}$	$9.44 \cdot 10^{-3}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$1.43 \cdot 10^{-2}$	$4.21 \cdot 10^{-4}$
	<sup>122</sup> Sb <sup>1</sup>	$1.49 \cdot 10^{-1}$	$2.48 \cdot 10^{-4}$	$4.88 \cdot 10^{-4}$	$7.37 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$1.65 \cdot 10^{-3}$	$2.05 \cdot 10^{-3}$	$2.49 \cdot 10^{-3}$	$7.26 \cdot 10^{-5}$
	<sup>124</sup> Sb <sup>1</sup>	$5.94 \cdot 10^{-1}$	$9.51 \cdot 10^{-4}$	$1.82 \cdot 10^{-3}$	$2.69 \cdot 10^{-3}$	$3.69 \cdot 10^{-3}$	$5.92 \cdot 10^{-3}$	$7.31 \cdot 10^{-3}$	$8.85 \cdot 10^{-3}$	$2.58 \cdot 10^{-4}$
	<sup>125</sup> Sb	$1.40 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-4}$	$4.66 \cdot 10^{-4}$	$7.09 \cdot 10^{-4}$	$9.90 \cdot 10^{-4}$	$1.64 \cdot 10^{-3}$	$2.09 \cdot 10^{-3}$	$2.72 \cdot 10^{-3}$	$8.73 \cdot 10^{-5}$
	<sup>123m</sup> Te	$4.14 \cdot 10^{-2}$	$7.43 \cdot 10^{-5}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$	$2.46 \cdot 10^{-4}$	$3.58 \cdot 10^{-4}$	$6.19 \cdot 10^{-4}$	$8.06 \cdot 10^{-4}$	$1.09 \cdot 10^{-3}$	$3.53 \cdot 10^{-5}$
	<sup>131</sup> I	$1.29 \cdot 10^{-1}$	$2.18 \cdot 10^{-4}$	$4.35 \cdot 10^{-4}$	$6.64 \cdot 10^{-4}$	$9.30 \cdot 10^{-4}$	$1.51 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	$2.29 \cdot 10^{-3}$	$6.57 \cdot 10^{-5}$
	<sup>134</sup> Cs <sup>1</sup>	$5.24 \cdot 10^{-1}$	$8.62 \cdot 10^{-4}$	$1.68 \cdot 10^{-3}$	$2.52 \cdot 10^{-3}$	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$5.58 \cdot 10^{-3}$	$7.02 \cdot 10^{-3}$	$8.52 \cdot 10^{-3}$	$2.49 \cdot 10^{-4}$
	<sup>137</sup> Cs	$1.88 \cdot 10^{-1}$	$3.12 \cdot 10^{-4}$	$6.15 \cdot 10^{-4}$	$9.19 \cdot 10^{-4}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$	$2.05 \cdot 10^{-3}$	$2.60 \cdot 10^{-3}$	$3.12 \cdot 10^{-3}$	$9.25 \cdot 10^{-5}$
<sup>140</sup> Ba	$5.97 \cdot 10^{-2}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$1.99 \cdot 10^{-4}$	$3.04 \cdot 10^{-4}$	$4.23 \cdot 10^{-4}$	$7.00 \cdot 10^{-4}$	$8.73 \cdot 10^{-4}$	$1.11 \cdot 10^{-3}$	$3.35 \cdot 10^{-5}$	
<sup>140</sup> La	$7.67 \cdot 10^{-1}$	$1.21 \cdot 10^{-3}$	$2.28 \cdot 10^{-3}$	$3.39 \cdot 10^{-3}$	$4.61 \cdot 10^{-3}$	$7.44 \cdot 10^{-3}$	$9.09 \cdot 10^{-3}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$	$3.24 \cdot 10^{-4}$	

<sup>1</sup> Die Zerfallsdaten für <sup>40</sup>K, <sup>228</sup>Ac, <sup>58</sup>Co, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>122</sup>Sb, <sup>124</sup>Sb et <sup>134</sup>Cs wurden (noch) der ICRP 38 entnommen, da sie in der Monographie BIPM5 nicht verfügbar sind.



# RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'UTILISATION DES FACTEURS DE CONVERSION $H^*(10)$ POUR LA MESURE DU DEBIT D'EQUIVALENT DE DOSE AMBIANT $\dot{H}^*(10)$ PAR SPECTROMETRIE IN SITU

## 1. Préambule

La spectrométrie gamma in situ est un outil de mesure de la radioactivité dans l'environnement. Cette technique permet d'identifier les radionucléides présents sur site, d'estimer leurs activités moyennes et de calculer les débits de dose associés. La détermination de l'activité des radionucléides dans le sol est basée sur la méthode décrite dans le rapport ICRU 53 [1]. La conversion de l'activité dans le sol en débit d'équivalent de dose ambiant  $\dot{H}^*(10)$  à 1 m n'est cependant pas triviale. En effet, si l'activité d'une source peut se calculer relativement facilement à partir des pics d'absorption totale, il en va tout autrement de la dose qui contient une part importante de rayonnement diffusé qui est extrêmement difficile à identifier sur le spectre.

## 2. Méthodes de calcul des facteurs de conversion $h^*(10)$

### 2.1 Etude de Lemerrier et collègues

Les méthodes de Monte Carlo appliquées au transport des radiations sont bien appropriées pour l'estimation du rayonnement diffusé. En pratique, la distribution de l'activité dans le sol est très variable et les volumes à prendre en considération sont extrêmement grands (typiquement, plusieurs centaines de mètres sont à considérer) et nécessitent des temps de calculs rédhibitoires. C'est pourquoi les répartitions des activités simulées sont généralement limitées par des hypothèses d'invariance horizontale et par le choix de trois modèles de répartition de l'activité : en surface ( $\beta=0$ ), décroissant exponentiellement ( $\beta>0$ ) et uniforme en profondeur ( $\beta=\infty$ ). Basés sur ces hypothèses, Lemerrier [1] et collègues ont estimé les facteurs de conversion  $h^*(10)$  de l'activité dans le sol en débit d'équivalent de dose ambiant  $\dot{H}^*(10)$  en utilisant le code Monte Carlo Geant 3. L'étude réalisée par Lemerrier [1] et collègues fournit les facteurs de conversion  $h^*(10)$  pour des rayonnements mono-énergétiques situés entre 50 et 2500 keV, pour différentes distributions d'activité dans le sol ( $0 \leq \beta \leq \infty$ ).

### 2.2 Validation du travail de Lemerrier et collègues

Dans le cadre d'une étude réalisée à l'IRA, les facteurs de conversion  $h^*(10)$  pour des rayonnements mono-énergétiques ont été recalculés à l'aide de Geant 4, dans des conditions identiques à celles utilisées par Lemerrier et collègues. L'avantage principal de la version 4

de Geant réside dans le meilleur traitement du transport des radiations, notamment en ce qui concerne l'ionisation dans un milieu peu dense comme l'air. Les résultats obtenus montrent un très bon accord (moins de 5% d'écart environ) entre les versions 3 et 4 de Geant pour des photons d'énergie située entre 200 et 1500 keV. Pour les hautes énergies (> 1500 keV), des différences inférieures à 10% sont observées entre les deux versions de Geant. En revanche, les facteurs de conversion pour les basses énergies (< 200 keV) peuvent différer de plus de 60% selon les modèles de répartition de l'activité dans le sol.

### 2.3 Facteurs de conversion $h^*(10)$ spécifiques aux radionucléides

Le facteur de conversion spécifique à un radionucléide est la somme des facteurs de conversion de chaque rayonnement mono-énergétique qu'il émet, pondérée par le rapport d'embranchement. Dans le cas d'une famille radioactive, en supposant l'équilibre, le facteur de conversion est la somme des facteurs de chaque radionucléide qui la compose. Le travail de Lemerrier et collègues propose des facteurs de conversion pour le  $^{40}\text{K}$  et le  $^{137}\text{Cs}$ , ainsi que pour les familles  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$ , mais uniquement pour une distribution uniforme de l'activité dans le sol.

## 3. Recommandations

Le groupe d'expert pour la dosimétrie recommande que les facteurs de conversion  $h^*(10)$  pour les principaux radionucléides soit calculés à partir des facteurs de conversion pour des rayonnements mono-énergétiques (50, 100, 200, 500, 662, 750, 1000, 1250, 1460, 2250 et 2500 keV) publiés par Lemerrier et collègues. Pour les autres énergies, les facteurs de conversion peuvent être calculés par interpolation (interpolation par splines). Pour chaque radionucléide, les facteurs de conversion sont alors déterminés pour les distributions d'activité dans le sol suivantes :  $\beta=0, 0.3, 1, 5, 10, 20, 50, \infty$ . Cependant, des investigations doivent être poursuivies afin d'analyser les écarts obtenus entre Geant 3 et Geant 4 pour les basses (< 200 keV) et hautes (>1500 keV) énergies. Dans le cadre de ces futurs travaux, le groupe recommande d'utiliser les données de désintégration des radionucléides (rapport d'embranchement) de la monographie n°5 publié par le Bureau International des Poids et Mesures BIPM [3] ainsi que la récente publication 107 de la CIPR [4]. Le tableau 1 fournit les facteurs de conversion pour différents radionucléides et différentes distribution de l'activité dans le sol caractérisé par le paramètre  $\beta$ .

## Références

- [1] ICRU Report 53, International Commission on Radiation Units and Measurements. *Gamma-Ray Spectrometry in the Environment*, Bethesda (USA), 1995.
- [2] M. Lemerrier, R. Gurriaran, P. Bouisset, X. Cagnat, Specific activity to  $H^*(10)$  conversion coefficients for in situ gamma spectrometry, *Radiat. Protect. Dosim.* 2008 128(1):83-89.
- [3] Monographie BIPM 5, *Table of Radionuclides*, Bureau International des Poids et Mesures, 2004, 2006 und 2008, über Internet zugänglich unter <http://www.bipm.org/en/publications/monographie-ri-5.html>
- [4] ICRP Publication 107, International Commission on Radiological Protection, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, Elsevier, Oxford, 2009.

Tableau 1: Facteurs de conversion h\*(10) de l'activité au sol en débit d'équivalent de dose ambiant H\*(10) pour plusieurs radionucléides d'intérêt.

	Radionucléide	Facteur de conversion h*(10)								(nSv/h)/ Bq Source ponctuelle
		(nSv/h)/ (Bq/kg) Homogène ( $\beta \rightarrow \infty$ )	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=50$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=20$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=10$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=5$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=1$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=0.3$	(nSv/h)/ (Bq/m <sup>2</sup> ) $\beta=0$	
Radionucléides naturels et descendants	<sup>232</sup> Th (total)	7.94·10 <sup>-1</sup>	1.25·10 <sup>-3</sup>	2.37·10 <sup>-3</sup>	3.51·10 <sup>-3</sup>	4.80·10 <sup>-3</sup>	7.79·10 <sup>-3</sup>	9.73·10 <sup>-3</sup>	1.19·10 <sup>-2</sup>	3.49·10 <sup>-4</sup>
	<sup>208</sup> Tl	1.12·10 <sup>0</sup>	1.71·10 <sup>-3</sup>	3.16·10 <sup>-3</sup>	4.57·10 <sup>-3</sup>	6.14·10 <sup>-3</sup>	9.79·10 <sup>-3</sup>	1.22·10 <sup>-2</sup>	1.48·10 <sup>-2</sup>	4.18·10 <sup>-4</sup>
	<sup>228</sup> Ac <sup>1</sup>	3.06·10 <sup>-1</sup>	4.93·10 <sup>-4</sup>	9.47·10 <sup>-4</sup>	1.42·10 <sup>-3</sup>	1.97·10 <sup>-3</sup>	3.23·10 <sup>-3</sup>	4.04·10 <sup>-3</sup>	4.99·10 <sup>-3</sup>	1.50·10 <sup>-4</sup>
	<sup>212</sup> Pb	4.52·10 <sup>-2</sup>	7.84·10 <sup>-5</sup>	1.61·10 <sup>-4</sup>	2.54·10 <sup>-4</sup>	3.63·10 <sup>-4</sup>	6.23·10 <sup>-4</sup>	7.79·10 <sup>-4</sup>	9.81·10 <sup>-4</sup>	2.89·10 <sup>-5</sup>
	<sup>212</sup> Bi	3.41·10 <sup>-2</sup>	5.51·10 <sup>-5</sup>	1.06·10 <sup>-4</sup>	1.58·10 <sup>-4</sup>	2.17·10 <sup>-4</sup>	3.48·10 <sup>-4</sup>	4.38·10 <sup>-4</sup>	5.42·10 <sup>-4</sup>	1.71·10 <sup>-5</sup>
	<sup>224</sup> Ra	3.44·10 <sup>-3</sup>	5.90·10 <sup>-6</sup>	1.20·10 <sup>-5</sup>	1.87·10 <sup>-5</sup>	2.61·10 <sup>-5</sup>	4.33·10 <sup>-5</sup>	5.36·10 <sup>-5</sup>	6.65·10 <sup>-5</sup>	1.87·10 <sup>-6</sup>
	<sup>238</sup> U (total)	5.53·10 <sup>-1</sup>	8.86·10 <sup>-4</sup>	1.70·10 <sup>-3</sup>	2.53·10 <sup>-3</sup>	3.47·10 <sup>-3</sup>	5.61·10 <sup>-3</sup>	6.92·10 <sup>-3</sup>	8.45·10 <sup>-3</sup>	2.46·10 <sup>-4</sup>
	<sup>214</sup> Bi	4.72·10 <sup>-1</sup>	7.47·10 <sup>-4</sup>	1.42·10 <sup>-3</sup>	2.10·10 <sup>-3</sup>	2.86·10 <sup>-3</sup>	4.60·10 <sup>-3</sup>	5.67·10 <sup>-3</sup>	6.89·10 <sup>-3</sup>	2.00·10 <sup>-4</sup>
	<sup>214</sup> Pb	7.90·10 <sup>-2</sup>	1.35·10 <sup>-4</sup>	2.71·10 <sup>-4</sup>	4.18·10 <sup>-4</sup>	5.90·10 <sup>-4</sup>	9.78·10 <sup>-4</sup>	1.21·10 <sup>-3</sup>	1.51·10 <sup>-3</sup>	4.43·10 <sup>-5</sup>
	<sup>226</sup> Ra	2.26·10 <sup>-3</sup>	3.96·10 <sup>-6</sup>	8.09·10 <sup>-6</sup>	1.29·10 <sup>-5</sup>	1.85·10 <sup>-5</sup>	3.11·10 <sup>-5</sup>	3.93·10 <sup>-5</sup>	4.88·10 <sup>-5</sup>	1.45·10 <sup>-6</sup>
<sup>7</sup> Be	1.70·10 <sup>-2</sup>	2.85·10 <sup>-5</sup>	5.63·10 <sup>-5</sup>	8.59·10 <sup>-5</sup>	1.19·10 <sup>-4</sup>	1.94·10 <sup>-4</sup>	2.37·10 <sup>-4</sup>	2.93·10 <sup>-4</sup>	8.40·10 <sup>-6</sup>	
<sup>40</sup> K <sup>1</sup>	5.17·10 <sup>-2</sup>	8.06·10 <sup>-5</sup>	1.51·10 <sup>-4</sup>	2.22·10 <sup>-4</sup>	2.98·10 <sup>-4</sup>	4.88·10 <sup>-4</sup>	5.92·10 <sup>-4</sup>	7.27·10 <sup>-4</sup>	2.12·10 <sup>-5</sup>	
Radionucléides artificiels	<sup>51</sup> Cr	1.08·10 <sup>-2</sup>	1.84·10 <sup>-5</sup>	3.70·10 <sup>-5</sup>	5.68·10 <sup>-5</sup>	7.94·10 <sup>-5</sup>	1.29·10 <sup>-4</sup>	1.58·10 <sup>-4</sup>	1.95·10 <sup>-4</sup>	5.45·10 <sup>-6</sup>
	<sup>54</sup> Mn	2.83·10 <sup>-1</sup>	4.56·10 <sup>-4</sup>	8.76·10 <sup>-4</sup>	1.31·10 <sup>-3</sup>	1.81·10 <sup>-3</sup>	2.88·10 <sup>-3</sup>	3.64·10 <sup>-3</sup>	4.42·10 <sup>-3</sup>	1.30·10 <sup>-4</sup>
	<sup>57</sup> Co	3.33·10 <sup>-2</sup>	6.09·10 <sup>-5</sup>	1.28·10 <sup>-4</sup>	2.06·10 <sup>-4</sup>	3.03·10 <sup>-4</sup>	5.16·10 <sup>-4</sup>	6.41·10 <sup>-4</sup>	7.94·10 <sup>-4</sup>	2.27·10 <sup>-5</sup>
	<sup>58</sup> Co <sup>1</sup>	3.29·10 <sup>-1</sup>	5.36·10 <sup>-4</sup>	1.04·10 <sup>-3</sup>	1.56·10 <sup>-3</sup>	2.14·10 <sup>-3</sup>	3.43·10 <sup>-3</sup>	4.32·10 <sup>-3</sup>	5.27·10 <sup>-3</sup>	1.54·10 <sup>-4</sup>
	<sup>60</sup> Co	8.25·10 <sup>-1</sup>	1.30·10 <sup>-3</sup>	2.50·10 <sup>-3</sup>	3.65·10 <sup>-3</sup>	4.96·10 <sup>-3</sup>	8.08·10 <sup>-3</sup>	9.92·10 <sup>-3</sup>	1.21·10 <sup>-2</sup>	3.54·10 <sup>-4</sup>
	<sup>59</sup> Fe	3.92·10 <sup>-1</sup>	6.21·10 <sup>-4</sup>	1.19·10 <sup>-3</sup>	1.75·10 <sup>-3</sup>	2.38·10 <sup>-3</sup>	3.88·10 <sup>-3</sup>	4.78·10 <sup>-3</sup>	5.82·10 <sup>-3</sup>	1.71·10 <sup>-4</sup>
	<sup>65</sup> Zn	1.89·10 <sup>-1</sup>	3.02·10 <sup>-4</sup>	5.84·10 <sup>-4</sup>	8.57·10 <sup>-4</sup>	1.17·10 <sup>-3</sup>	1.90·10 <sup>-3</sup>	2.36·10 <sup>-3</sup>	2.87·10 <sup>-3</sup>	8.41·10 <sup>-5</sup>
	<sup>95</sup> Zr <sup>1</sup>	2.48·10 <sup>-1</sup>	4.07·10 <sup>-4</sup>	7.93·10 <sup>-4</sup>	1.18·10 <sup>-3</sup>	1.64·10 <sup>-3</sup>	2.61·10 <sup>-3</sup>	3.32·10 <sup>-3</sup>	4.01·10 <sup>-3</sup>	1.18·10 <sup>-4</sup>
	<sup>95</sup> Nb <sup>1</sup>	2.58·10 <sup>-1</sup>	4.22·10 <sup>-4</sup>	8.19·10 <sup>-4</sup>	1.22·10 <sup>-3</sup>	1.69·10 <sup>-3</sup>	2.69·10 <sup>-3</sup>	3.42·10 <sup>-3</sup>	4.15·10 <sup>-3</sup>	1.21·10 <sup>-4</sup>
	<sup>99m</sup> Tc	3.63·10 <sup>-2</sup>	6.60·10 <sup>-5</sup>	1.38·10 <sup>-4</sup>	2.20·10 <sup>-4</sup>	3.20·10 <sup>-4</sup>	5.39·10 <sup>-4</sup>	6.70·10 <sup>-4</sup>	8.35·10 <sup>-4</sup>	2.35·10 <sup>-5</sup>
	<sup>110m</sup> Ag	9.24·10 <sup>-1</sup>	1.49·10 <sup>-3</sup>	2.87·10 <sup>-3</sup>	4.28·10 <sup>-3</sup>	5.88·10 <sup>-3</sup>	9.44·10 <sup>-3</sup>	1.18·10 <sup>-2</sup>	1.43·10 <sup>-2</sup>	4.21·10 <sup>-4</sup>
	<sup>122</sup> Sb <sup>1</sup>	1.49·10 <sup>-1</sup>	2.48·10 <sup>-4</sup>	4.88·10 <sup>-4</sup>	7.37·10 <sup>-4</sup>	1.02·10 <sup>-3</sup>	1.65·10 <sup>-3</sup>	2.05·10 <sup>-3</sup>	2.49·10 <sup>-3</sup>	7.26·10 <sup>-5</sup>
	<sup>124</sup> Sb <sup>1</sup>	5.94·10 <sup>-1</sup>	9.51·10 <sup>-4</sup>	1.82·10 <sup>-3</sup>	2.69·10 <sup>-3</sup>	3.69·10 <sup>-3</sup>	5.92·10 <sup>-3</sup>	7.31·10 <sup>-3</sup>	8.85·10 <sup>-3</sup>	2.58·10 <sup>-4</sup>
	<sup>125</sup> Sb	1.40·10 <sup>-1</sup>	2.35·10 <sup>-4</sup>	4.66·10 <sup>-4</sup>	7.09·10 <sup>-4</sup>	9.90·10 <sup>-4</sup>	1.64·10 <sup>-3</sup>	2.09·10 <sup>-3</sup>	2.72·10 <sup>-3</sup>	8.73·10 <sup>-5</sup>
	<sup>123m</sup> Te	4.14·10 <sup>-2</sup>	7.43·10 <sup>-5</sup>	1.54·10 <sup>-4</sup>	2.46·10 <sup>-4</sup>	3.58·10 <sup>-4</sup>	6.19·10 <sup>-4</sup>	8.06·10 <sup>-4</sup>	1.09·10 <sup>-3</sup>	3.53·10 <sup>-5</sup>
	<sup>131</sup> I	1.29·10 <sup>-1</sup>	2.18·10 <sup>-4</sup>	4.35·10 <sup>-4</sup>	6.64·10 <sup>-4</sup>	9.30·10 <sup>-4</sup>	1.51·10 <sup>-3</sup>	1.87·10 <sup>-3</sup>	2.29·10 <sup>-3</sup>	6.57·10 <sup>-5</sup>
	<sup>134</sup> Cs <sup>1</sup>	5.24·10 <sup>-1</sup>	8.62·10 <sup>-4</sup>	1.68·10 <sup>-3</sup>	2.52·10 <sup>-3</sup>	3.48·10 <sup>-3</sup>	5.58·10 <sup>-3</sup>	7.02·10 <sup>-3</sup>	8.52·10 <sup>-3</sup>	2.49·10 <sup>-4</sup>
	<sup>137</sup> Cs	1.88·10 <sup>-1</sup>	3.12·10 <sup>-4</sup>	6.15·10 <sup>-4</sup>	9.19·10 <sup>-4</sup>	1.28·10 <sup>-3</sup>	2.05·10 <sup>-3</sup>	2.60·10 <sup>-3</sup>	3.12·10 <sup>-3</sup>	9.25·10 <sup>-5</sup>
<sup>140</sup> Ba	5.97·10 <sup>-2</sup>	1.01·10 <sup>-4</sup>	1.99·10 <sup>-4</sup>	3.04·10 <sup>-4</sup>	4.23·10 <sup>-4</sup>	7.00·10 <sup>-4</sup>	8.73·10 <sup>-4</sup>	1.11·10 <sup>-3</sup>	3.35·10 <sup>-5</sup>	
<sup>140</sup> La	7.67·10 <sup>-1</sup>	1.21·10 <sup>-3</sup>	2.28·10 <sup>-3</sup>	3.39·10 <sup>-3</sup>	4.61·10 <sup>-3</sup>	7.44·10 <sup>-3</sup>	9.09·10 <sup>-3</sup>	1.11·10 <sup>-2</sup>	3.24·10 <sup>-4</sup>	

<sup>1</sup> Les données de désintégration du <sup>40</sup>K, <sup>228</sup>Ac, <sup>58</sup>Co, <sup>95</sup>Zr, <sup>95</sup>Nb, <sup>122</sup>Sb, <sup>124</sup>Sb et <sup>134</sup>Cs proviennent de la publication ICRP 38 car ces dernières ne sont pas disponibles dans la monographie BIPM5.