

# INTERCOMPARAISON EUROPEENNE D'UTILISATEURS DE CODES MONTE CARLO POUR LE CALCUL D'INCERTITUDES SUR LE KERMA DANS L'AIR AUPRES D'UNE SOURCE DE CESIUM-137

Loïc de Carlan, Jean-Marc Bordy, Jean Gouriou.

CEA, LIST, Laboratoire National Henri Becquerel, Laboratoire de Métrologie de la Dose, F-91191 GIF SUR YVETTE CEDEX, France. [loic.decarlan@cea.fr](mailto:loic.decarlan@cea.fr)

## Résumé

Dans le cadre du projet européen CONRAD (Coordinated Network for Radiation Dosimetry, contrat FP6-12684) coordonné par EURADOS (EUropean RADIation DOSimetry group), le groupe de travail 4 (WP4) avait pour objectif de s'intéresser à la dosimétrie numérique avec une action particulière appelée "Uncertainty assessment in computational dosimetry : an intercomparison of approaches". Le principe de cette action était de proposer à la communauté internationale de modéliser huit problèmes traitant de domaines variés concernant le transport du rayonnement (photons, neutrons, protons et électrons). L'objectif de cette communication est de présenter le problème n°4 traitant de la simulation d'un irradiateur contenant une source de  $^{137}\text{Cs}$  pour le calcul du kerma dans l'air. Ce problème a été proposé par H. Vincke (CERN), C. Hranitsky (ARCS, Autriche) et J.-M. Bordy (CEA LIST). Il avait pour objectif principal d'estimer l'incertitude globale sur la valeur du kerma dans l'air en prenant en compte des composantes de celle-ci non accessibles à la mesure, notamment celles dues aux différents paramètres de la géométrie : position de la source, diamètre du collimateur, densité des matériaux... De plus d'autres questions étaient également proposées. Elles concernaient l'influence de l'enveloppe de la source et du collimateur sur la fluence, le kerma dans l'air et la pénombre du faisceau. Celles-ci ne sont pas présentées dans cette communication.

## Présentation du problème

### Géométrie

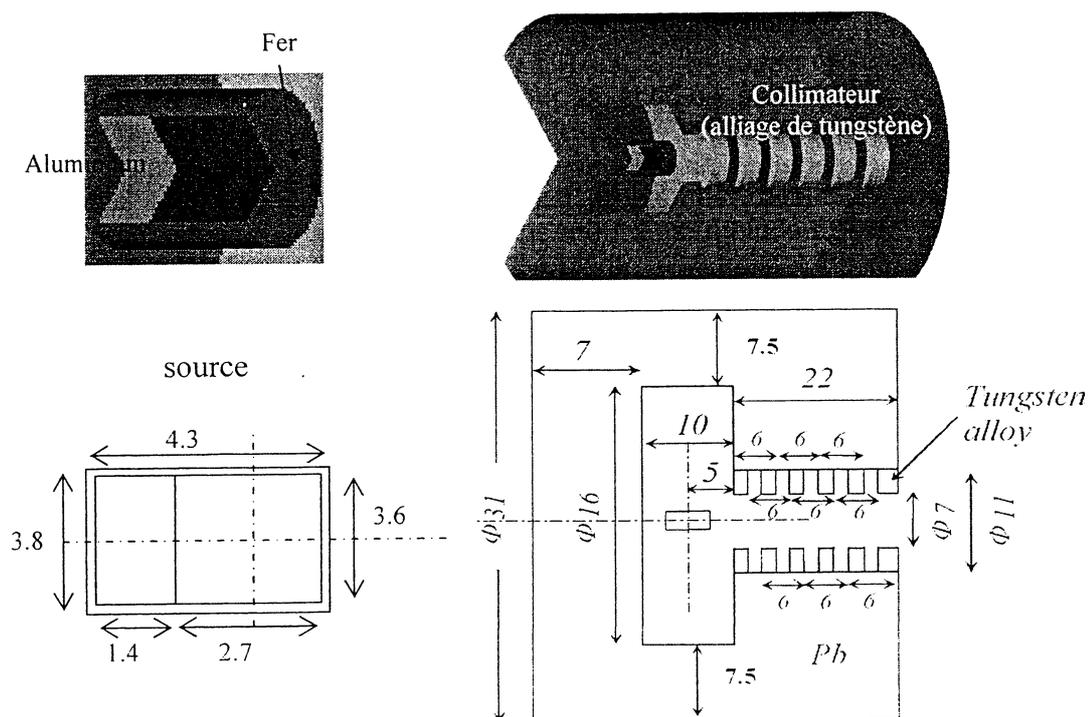


Figure 1: Vue en coupe et en trois dimensions de l'irradiateur de  $^{137}\text{Cs}$  et de la source modélisés.

L'irradiateur dont la géométrie est présentée en figure 1, est basé sur les spécifications de la norme ISO 4037 [1]. Ils sont plus spécifiquement dévolus à l'établissement de références dosimétriques dans les laboratoires de métrologie. Les données des matériaux et les données nucléaires étaient fournies. Le calcul du kerma dans l'air était basé sur l'utilisation des coefficients de conversion de la fluence des photons vers le kerma dans l'air, les données étant extraites de l'ICRU 57 [2]. Le point de mesure est défini à 50 cm du centre de la partie radioactive de la source.

### Questions aux participants

Quatre questions étaient proposées : (1) étude de l'incertitude sur le kerma dans l'air lié à la variation de plusieurs paramètres (les détails sont donnés ci-après) ; (2) influence de la capsule de la source ; (3) influence du collimateur ; (4) influence du volume de l'air entourant la source. Seule la question 1 est traitée dans cette communication. Par ailleurs, afin d'avoir un point de comparaison assez simple, il a été ajouté une question. Celle-ci concerne le calcul du kerma dans l'air à 50 cm de la source exprimé en Gy/photon émis, cette question sera indiquée 0 (Q0).

La question 1, la plus intéressante de l'exercice, avait pour objectif d'effectuer le calcul du bilan d'incertitudes sur la valeur de référence du kerma dans l'air (Q0) en faisant varier des paramètres qui sont très difficiles voire impossibles à estimer expérimentalement comme par exemple : la position de la source, la densité des matériaux, la géométrie du collimateur. L'approche proposée consiste à faire varier chaque paramètre séparément. La difficulté principale est de pouvoir détecter une faible variation du kerma due à une faible variation du paramètre sans pour autant avoir des temps de calculs trop élevés. L'approche proposée pour résoudre ce problème est la suivante (voir Figure 2):

- 1) Augmenter l'amplitude du paramètre à faire varier de manière à pouvoir obtenir une différence significative par rapport au kerma de référence sans avoir un temps de calcul trop long (colonne 2, Tableau 1),
- 2) Calculer la pente de la variation du  $K_{air}$  ( $\partial k_{air} / \partial x$ , colonne 3 tableau 1) pourvu que  $u_{MC} / \Delta k_{air} < 0,1$ . Ce critère est très important puisqu'il signifie que la variation du kerma observé doit être dix fois plus importante que l'incertitude sur le calcul Monte Carlo. Autrement dit, cela signifie que l'influence de l'incertitude du calcul est négligeable devant la variation du kerma. Le calcul est fait en supposant que la variation du kerma est linéaire avec le paramètre étudié ( $\partial k_{air} / \partial x$  constante dans l'intervalle  $\pm \Delta X$ ),
- 3) Calculer l'incertitude standard ( $u$ , colonne 5 Tableau 1). Ce calcul dépend de la distribution considérée, de type gaussienne, triangulaire ou rectangulaire, voir ISO 13005[3] et correspond à la variation du paramètre  $dx$  (par exemple pour une variation de distance de la source de 1 mm,  $u = 2 \cdot dx / (2\sqrt{3})$  en considérant une distribution rectangulaire),
- 4) Calculer  $\Delta k_{air} = (\partial k_{air} / \partial x) \cdot u$ .

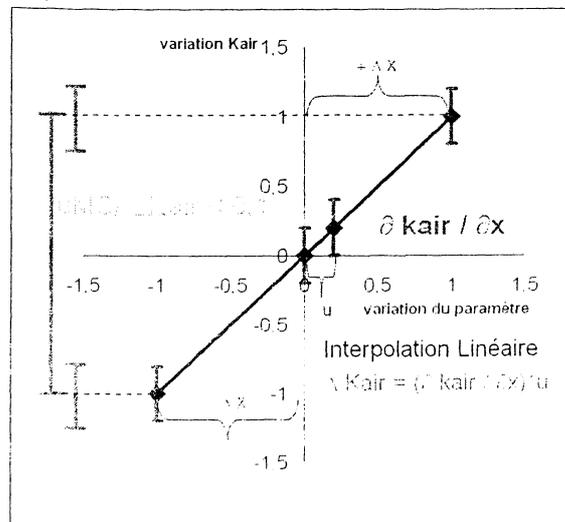


Figure 2 : Présentation de la méthode d'évaluation de l'incertitude.

Tableau 1: Paramètres servant au calcul de l'incertitude sur le kerma dans l'air

Paramètre X	variation du paramètre dans le calcul		Variation estimée sur le paramètre *	Incertitude type sur le paramètre	
	$\Delta X$	$\partial k_{air} / \partial X$		$u$	$\Delta k_{air}$
Position de la source (décalage /axe)	+ $\Delta X/2$		+0,05 cm	$0,1 / 2\sqrt{3}$	$(\partial k_{air} / \partial X) \cdot u$
Volume de la chambre (profondeur)	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,2 cm	$0,4 / 2\sqrt{3}$	
Anneaux du collimateur (diamètre)	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,05 cm	$0,1 / 2\sqrt{3}$	
Densité de l'alliage de tungstène	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,2 g/cm <sup>3</sup>	$0,4 / 2\sqrt{3}$	
Densité du CsCl	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,2 g/cm <sup>3</sup>	$0,4 / 2\sqrt{3}$	
Position de la source (profondeur)	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,1 cm	$0,2 / 2\sqrt{3}$	
Volume de la chambre (diamètre)	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,05 cm	$0,1 / 2\sqrt{3}$	
Longueur des anneaux du collimateur	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,05 cm	$0,1 / 2\sqrt{3}$	
Densité de l'aluminium	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,05 g/cm <sup>3</sup>	$0,1 / 2\sqrt{3}$	
Densité du fer	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,05 g/cm <sup>3</sup>	$0,1 / 2\sqrt{3}$	
Densité du plomb	+/- ( $\Delta X/2$ )		+/-0,1 g/cm <sup>3</sup>	$0,2 / 2\sqrt{3}$	
Energie de coupure*	+/- ( $\Delta X/2$ )				
Sections efficaces et modèles physiques **					

\* Incertitude pouvant être issue de données de la littérature, de livres, d'expériences...

\*\* Paramètres qui peuvent introduire un biais.

### Méthode utilisée par les auteurs

Les auteurs ont utilisé MCNP version 4c2 [4] pour réaliser les différents calculs. Diverses possibilités ont été étudiées pour calculer la fluence spectrale des photons et le kerma dans l'air. Les « tallies » F2 (fluence moyennée sur une surface), F4 (fluence moyennée dans un volume) et F5 (détecteur point) ont été comparés dans une géométrie simplifiée (ainsi qu'avec un calcul « manuel »). Il a été observé une différence inférieure à 0,1 % entre les trois méthodes. Etant donné que le calcul du tally F5 est beaucoup plus rapide que les autres et que l'objectif final était de calculer des variations relatives et non une valeur absolue, c'est ce tally qui a été systématiquement utilisé par la suite. La carte « PERT » n'a pas été utilisée car elle n'est pas disponible avec le tally F5 (pour cette version de code).

Pour calculer le kerma dans l'air à partir de la fluence, la carte « DE-DF » a été utilisée : elle permet de multiplier directement la fluence obtenue dans chaque bin en énergie par le coefficient de conversion adapté selon une interpolation Log-Log. La carte « PHYS » qui paramètre les choix du transport des particules a été utilisée avec les options par défaut. Le mode de transport choisi est le mode P, car il est plus rapide que le mode P,E et ne montre pas de différence significative avec le mode P,E. Le temps de calcul de chaque valeur est d'environ 840 minutes sur un PC à 3,2 GHz (1Go de RAM). La solution des auteurs n'a pas été prise comme référence, mais simplement ajoutée à la comparaison de tous les résultats collectés. La valeur du kerma dans l'air obtenue par les auteurs dans la configuration de base est de  $8,17660 \cdot 10^{-5}$  (+/- 0,01 %) pGy/particule émise.

### Participants et codes utilisés

Dans cet exercice, 12 instituts de 10 pays ont participé : Royaume Uni (1), République Tchèque (1), Etats-Unis (2), Russie (1), Allemagne (1), Pologne (1), Espagne (1), Suisse (1), Portugal (1), France (2). Les codes utilisés étaient principalement de la famille MCNP-MCNPX avec également deux codes Monte Carlo « faits maison » (Figure 3).

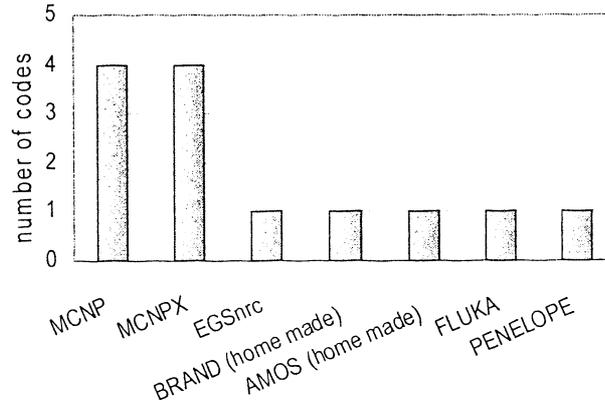


Figure 3 : Codes utilisés par les divers participants pour résoudre le problème 4.

### Résultats

Il est à noter que tous les résultats ne peuvent être présentés dans cette communication et qu'il s'agit d'en extraire les résultats les plus significatifs.

#### Solution de la question Q0

La question Q0 consistait à demander à chaque participant la valeur du kerma de référence dans les conditions standard. Les résultats sont présentés sur la Figure 4 sous forme non pas de valeur absolue mais en représentant l'écart relatif par rapport à la moyenne des résultats collectés, en excluant le participant b). L'écart-type obtenu est d'environ 1,4%, ce qui est plutôt satisfaisant et montre que la géométrie et les paramètres de simulation pris par les participants sont corrects. Des investigations approfondies pour le cas du participant b) ont montré qu'il y avait une erreur de modélisation de la source car le cylindre où est opéré le tirage des particules initiales était orienté dans un axe différent de celui du cylindre radioactif.

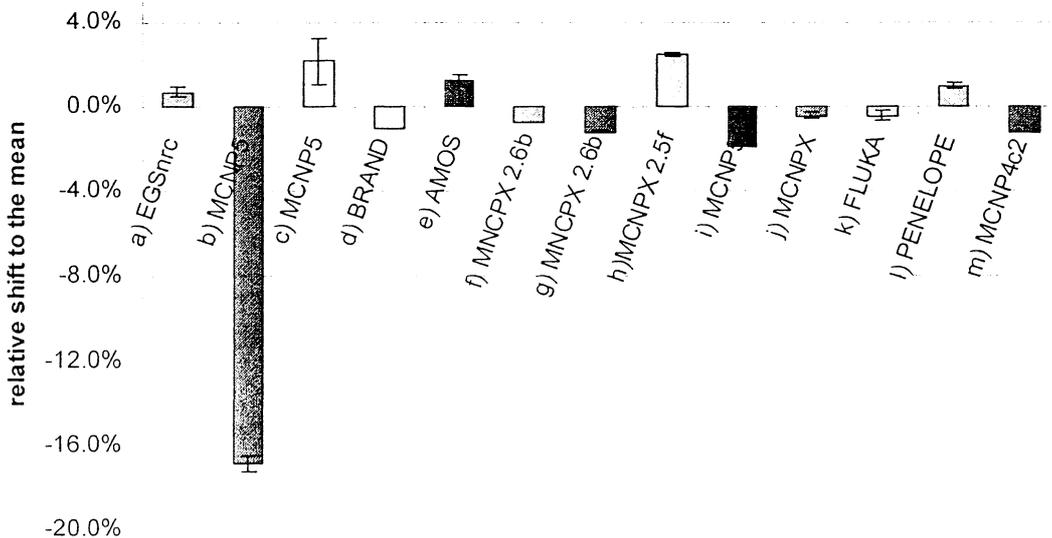


Figure 4 : Ecart relatif des participants pour la question Q0.

Solution de la question Q1

a) Calcul de la variation du kerma

Tous les participants ont répondu à la Question 1. Pour comparer les résultats, l'analyse a été réalisée pas à pas. La première comparaison a consisté à regarder le paramètre  $\partial k_{air}/\partial x$  qui correspond à la colonne 3 du tableau 1 pour chaque paramètre modélisé et pour chaque participant. Les résultats sont présentés en Figure 5 (la ligne joignant les points n'a pas de signification physique mais sert simplement de guide). Il y a un accord satisfaisant entre certains participants mais pour d'autres, les différences peuvent atteindre plusieurs ordres de grandeur, ce qui est très surprenant en considérant la question 0.

Pour calculer la pente  $\partial k_{air}/\partial x$ , certains participants n'ont pas seulement utilisé deux points mais une distribution comprenant jusqu'à 10 points distincts.

Pour mieux comprendre les écarts, il a été décidé de s'intéresser au paramètre  $u_{MC}/\Delta K$ .

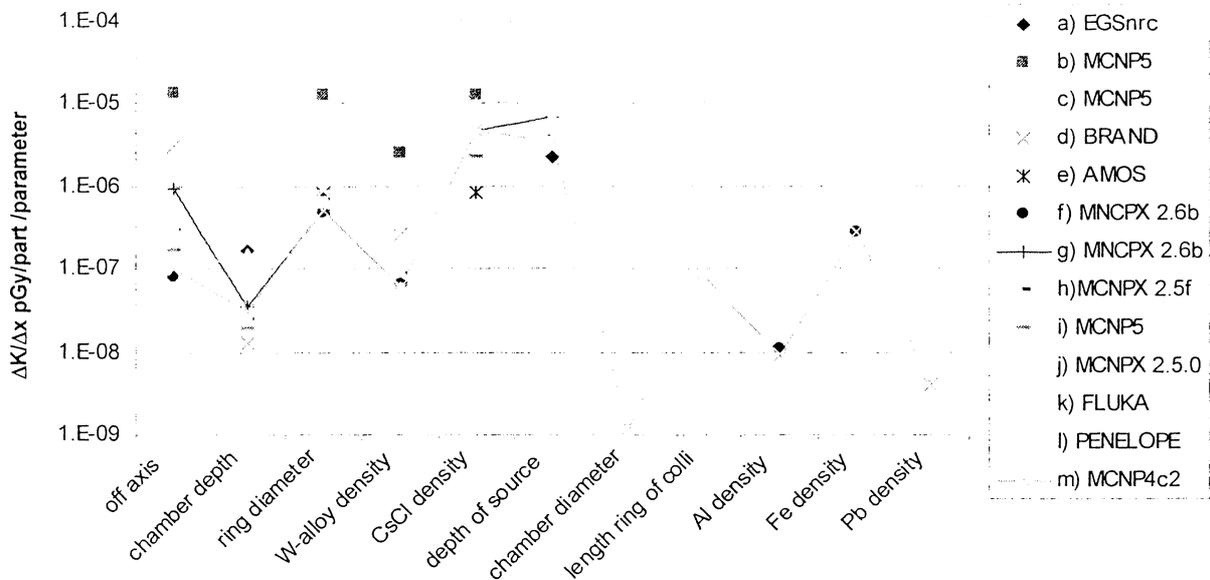


Figure 5 : Valeurs de  $\partial k_{air}/\partial x$  pour tous les paramètres étudiés et tous les participants.

b)  $u_{MC}/\Delta K$  pour tous les participants

Comme expliqué précédemment, le rapport  $u_{MC}/\Delta K$  est un bon indicateur de la fiabilité de la simulation. Ce rapport permet de comparer la variation du kerma et l'incertitude liée à la simulation. La Figure 6 présente ces rapports. Il apparaît que la moitié des calculs ne passent pas le critère  $<0,1\%$ . Cela signifie que pour la moitié des calculs, l'incertitude est trop élevée pour conclure sur l'influence du paramètre étudié sur la variation du kerma. Cela peut s'expliquer par le fait que les temps de calculs sont très longs et du nombre de paramètres à étudier. Cela signifie par ailleurs que le bilan d'incertitude global ne peut être calculé de façon satisfaisante dans ces conditions.

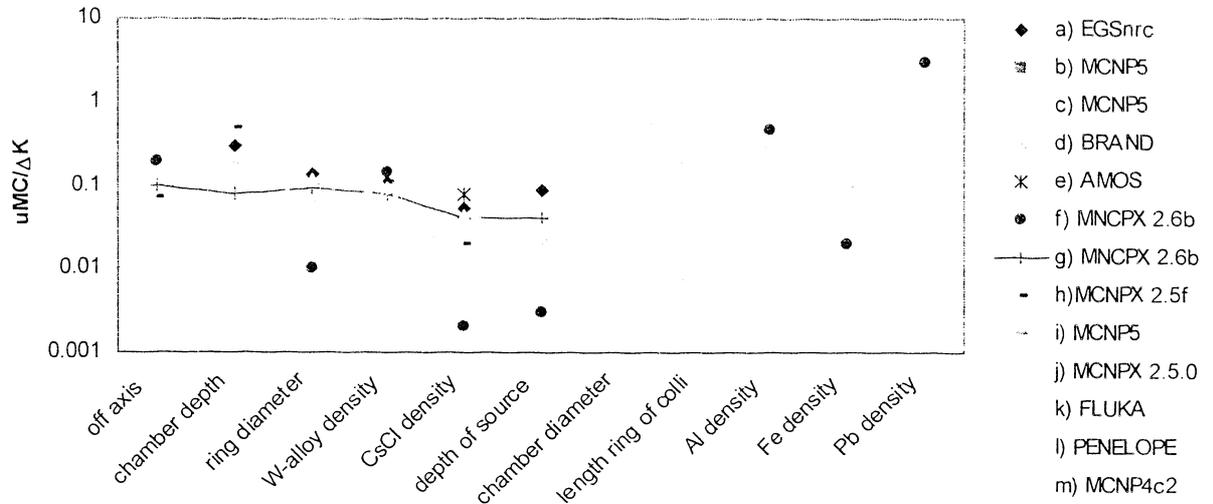


Figure 6 :  $u_{MC}/\Delta K$  pour les différents paramètres et les différents participants.

c) *Bilan d'incertitudes pour la question 1*

La Figure 7 présente la contribution relative de chaque paramètre au bilan d'incertitude global (exprimée en pourcentage). Les deux principaux paramètres qui influencent le bilan total sont la densité de la source et la position de celle-ci. D'un autre côté, la profondeur de la chambre, les densités de l'aluminium et du plomb ainsi que la largeur de la cavité interne de l'irradiateur n'ont qu'une influence très mineure. L'incertitude totale est d'environ 0,7 % ( $k=1$ ) pour la solution proposée par les auteurs. La contribution de la densité de la source est de 0,6 % ( $\pm 0,2 \text{ g. cm}^{-3}$ ) et celle de la position de la source de 0,3 % ( $\pm 0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ ). Les autres paramètres peuvent être considérés comme négligeables.

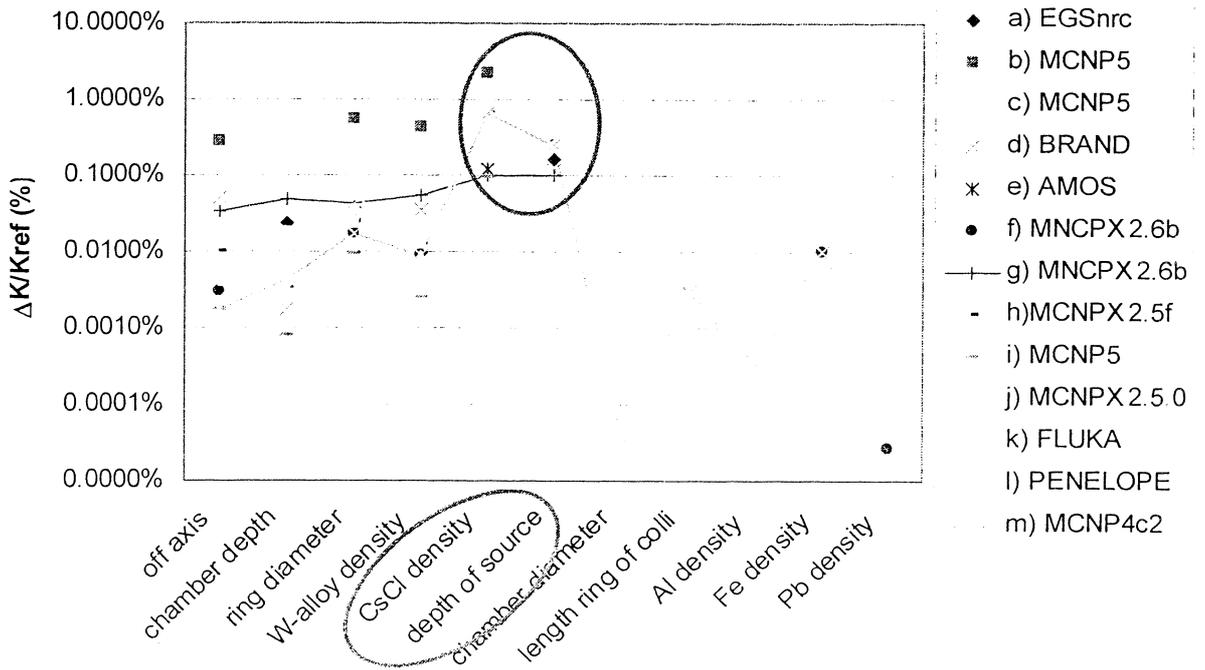


Figure 7 : Contribution relative de chaque paramètre à l'incertitude finale sur le kerma dans l'air.

**Remarque** : La méthode proposée peut conduire à obtenir des valeurs de contribution à l'incertitude totale qui sont plus faibles que l'incertitude obtenue dans la configuration de référence. La question se pose de savoir si ces contributions peuvent être considérées comme significatives. La réponse est oui, pourvu que le critère  $uMC/\Delta K < 0,1$ . Cela signifie que la variation du kerma est significative vis-à-vis de l'incertitude sur le calcul.

## Conclusion

Le but de cette étude était d'estimer le bilan d'incertitudes lié à la détermination du kerma dans l'air en simulant un irradiateur réaliste de  $^{137}\text{Cs}$ . Une approche particulière a été proposée pour le calcul de l'incertitude en étudiant chaque paramètre séparément et en supposant qu'il n'existait pas de corrélation entre ces paramètres. 12 instituts de 10 pays ont participé à cet exercice montrant l'intérêt de cette proposition même si tous les participants n'ont pas répondu à l'ensemble des questions proposées. Les résultats montrent un bon accord en ce qui concerne la valeur de référence du kerma dans l'air. Par contre, dans la question 1, des différences significatives ont pu être observées entre participants. Cela est partiellement dû au fait que la variation du kerma est faible pour la plupart des paramètres étudiés. En effet, quand la sensibilité de variation du kerma augmente, les résultats sont en meilleur accord. Les temps de calcul n'étaient parfois pas suffisants pour obtenir le critère fixé de  $uMC/\Delta k_{\text{air}} < 0,1$  %. Le bilan d'incertitude global est d'environ 0,7 % dont la contribution est majoritairement due à la variation de la densité de la source et la distance de celle-ci.

Pour finir, les auteurs remercient chaleureusement les participants pour leur contribution et pour le travail qu'ils ont réalisé.

## Références

- [1] ISO 4037-1. *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy -- Part 1: Radiation characteristics and production methods* (1996)
- [2] International Commission on Radiation Units and Measurements. *Conversion Coefficients for use in Radiological Protection Against External Radiation, ICRU Report 57* (Bethesda, MD: ICRU Publications) (1998)
- [3] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, *Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM), ISBN 92-67-10188-9 (1995)
- [4] J. F. Briesmeister. (Ed.) *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*. Los Alamos National Laboratory (LANL), Technical Report LA-13709-M (2000)