

Cs₁₃₇ : données physiques comparées à celles du K₄₀ ; effets ionisants respectifs. leurs isotopes stables dans l'organisme humain.

Yves Lenoir, juillet 2013

Préambule

Ce papier s'adresse à toute personne s'interrogeant sur la nocivité particulière du Cs₁₃₇ dans l'organisme humain, notamment celui des enfants. L'accident de Tchernobyl a provoqué une vaste dissémination de quantités extrêmement importantes de ce radionucléide jusqu'à des distances de plusieurs centaines, voire milliers, de km. Ces retombées sont dans ces régions supérieures d'un ou plusieurs ordres de grandeur à celles de toutes les explosions atomiques dans l'atmosphère auxquelles les Etats ont procédé entre 1945 et 1980.

Dès la fin 1988 les médecins biélorusses, ukrainiens et russes exerçant dans les régions contaminées étaient convaincus que la dégradation inquiétante de l'état de santé des enfants trouvait sa cause dans la radioactivité de Tchernobyl. Entre 1990 et 1999, date de son incarcération, Youry Bandazhevsky, sa femme Galina Bandazhevskaya, et des dizaines de chercheurs travaillant sous sa direction ont établi le rôle éminent du Cs₁₃₇ dans un grand nombre de pathologies cancéreuses et non cancéreuses affectant principalement les enfants.

Néanmoins, la doctrine officielle de L'UNSCEAR et la CIPR en cette matière maintient la relative innocuité de ce radio-isotope, par analogie avec celle du K₄₀ d'origine naturelle dont notre organisme contient en moyenne 50 Bq/kg de poids de corps. Cette doctrine qui permet de nier tout cause « Tchernobyl » dans les maux qui accablent les enfants vivant dans les régions contaminées est résumée en quelques lignes dans la fiche technique « Cs₁₃₇ et Ba_{137m} » de l'IRSN :

“Le modèle est décrit pour le travailleur dans la publication 56 de la CIPR (1990). Le césium incorporé par l'homme se distribue comme son homologue et compétiteur naturel, le potassium, dans l'ensemble de l'organisme en se concentrant préférentiellement dans le muscle.”

Concernant les effets sur la santé, il est rappelé que :

“V.4 Dangerosité

La toxicité chimique du césium étant faible, seule la radio-toxicité du ¹³⁷Cs est à considérer. Celle-ci a été expérimentée sur l'animal (chien) : l'activité létale 50 (i.e. conduisant au décès d'un animal sur deux) est de l'ordre de 1×10^8 Bq.kg⁻¹ et aucun effet toxique aigu n'a été observé au-dessous de 5×10^7 Bq.kg⁻¹”

Découlent de ce point de vue des doses maximales admissibles extrêmement élevées, qui peuvent, en cas d'ingestion chronique, conduire à des concentrations de plusieurs centaines de Bq/kg dans l'organisme humain. Voici ce qui est écrit à ce sujet dans la fiche de l'IRSN :

“Dans l'Union Européenne, des normes d'interdiction de commercialisation ont été instaurées depuis 1987 pour l'éventualité d'un accident futur [Règlements Euratom 3954/87, 2218/89 et 770/90].

Denrées alimentaires prêtes à la consommation				Aliments pour le bétail prêts à la consommation		
Aliments pour le nourrisson	Produits laitiers	Autres denrées alimentaires	Liquides destinés à la consommation	Porc	Volaille Agneau Veau	Autres
400 Bq.kg ⁻¹	1000 Bq.kg ⁻¹	1250 Bq.kg ⁻¹	1000 Bq.kg ⁻¹	1250 Bq.kg ⁻¹	2500 Bq.kg ⁻¹	5000 Bq.kg ⁻¹

Les lignes qui suivent vont montrer que, contrairement aux assertions des organismes onusiens chargés de dire la science sur les effets des radiations atomiques, l'UNSCEAR, et de déterminer les recommandations en matière de radioprotection, la CIPR, ni sur le plan biologique, ni sur celui de ses émissions radioactives, le Cs₁₃₇ ne peut être pertinemment assimilé au K₄₀.

Par ailleurs, le rapprochement de ces valeurs de la dynamique d'incorporation du Césium dans l'organisme (ingestions chroniques ou épisodiques rappelées dans la *Publication III* de la CIPR (Avril 2011) suggère les ordres de grandeur « acceptables » de la contamination corporelle des adultes, des enfants et des nourrissons. Cet ordre de grandeur de valeurs sera retenu pour les simulations d'irradiation interne.

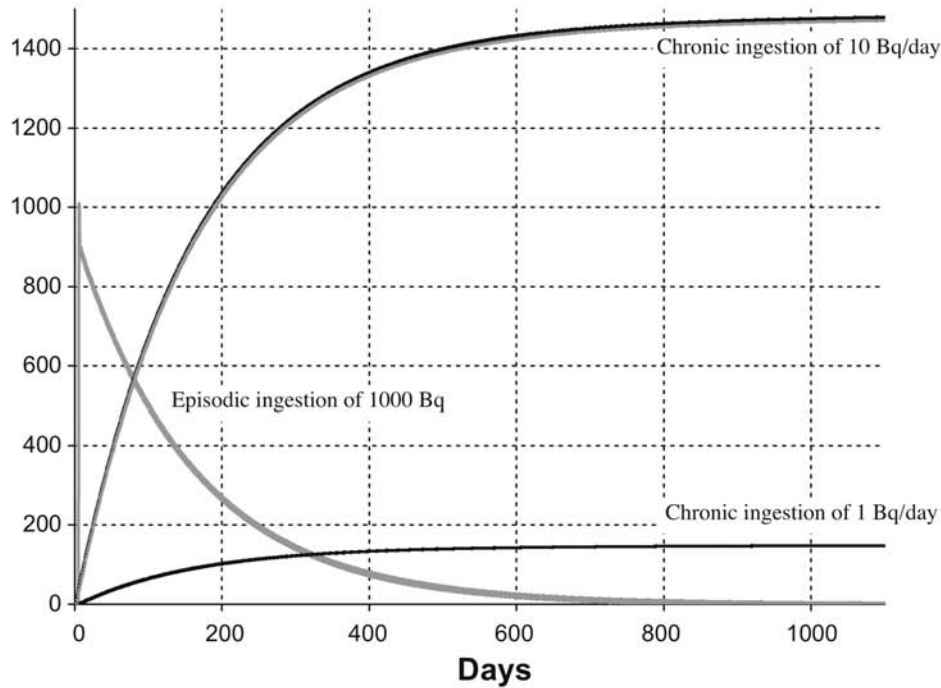


Fig. 2.2. Evolution over a pluri-annual period (1000 days) of whole-body activity (Bq) associated with an episodic intake of 1000 Bq and daily intake of 1 and 10 Bq of ^{137}Cs .

Résumé

On établit que le comportement biochimique global du césium (décrit par sa période biologique) diffère sensiblement de celui du potassium. La raison est à chercher dans la différence entre leurs énergies de première ionisation.

On se donne un modèle géométrique simplifié du cœur humain pour dessiner une carte approximative de la densité d'irradiation de l'organe, par le Cs_{137} , selon une concentration fréquemment rencontrée dans la population des régions du Belarus touchées par Tchernobyl, et par le K_{40} , selon sa concentration dans les tissus musculaires. Les résultats attestent de la part prépondérante du rayonnement β ajouté. Le rayonnement gamma du césium est absorbé de façon non homogène. Cette énergie est très supérieure à celle provenant du rayonnement gamma du potassium. Néanmoins elle ne représente que 20% de l'énergie ionisante totale ajoutée absorbée par le tissu musculaire cardiaque.

Table des chapitres

<u>1. Périodes biologiques : une différence capitale.</u>	p. 3
<u>2. Désintégrations des isotope K_{40} et Cs_{137} : des différences conséquentes.</u>	p. 4
2.1. Rayons gamma.	p. 4
2.2. Rayons β .	p. 5
<u>3. Modélisation de l'irradiation gamma du cœur humain.</u>	p. 6
3.1. Modèle géométrique simplifié.	p. 6
3.2. Schéma du calcul.	p. 7
<u>4. Résultats numériques ; interprétation.</u>	p. 7
4.1. Comparaison Cs_{137} – K_{40} (phase de diastole, à pondérer : modèle sphérique)	p. 8
4.2. Cs_{137} : comparaison adulte-enfant (systole, à pondérer : modèle ellipsoïdal)	p. 9
4.3. Interprétation	p. 9
<u>5. Énergie des rayonnements β.</u>	p. 9
<u>6. Constat</u>	p. 9
<u>Annexes</u>	p. 10

1. Périodes biologiques : une différence capitale.

Le K_{40} a une origine naturelle. Il ne peut donc servir à mesurer la période biologique du potassium dans l'organisme. Le recours à un autre isotope radioactif K_{42} ou K_{43} , artificiel et émetteur gamma de périodes courtes, du potassium a permis d'établir que cet élément a une période biologique de l'ordre de 20 jours dans l'organisme humain.

Les comportements biologiques des isotopes d'un même élément étant strictement identiques, le K_{40} se répartit dans l'organisme comme le potassium stable et participe aux mêmes échanges biochimiques, notamment ceux du phénomène essentiel pour l'équilibre général de la santé connu sous le nom de « *pompe sodium-potassium* » qui contrôle la concentration du potassium dans les cellules.

Chacun doit toujours avoir présent à l'esprit qu'un isotope radioactif ne se distingue en rien de son cousin stable. Car lorsqu'on observe sa désintégration, il vient de cesser d'exister et s'est transformé en un élément aux propriétés chimiques différentes !

Le K_{40} a une demie-vie de 1,25 Md d'années ; donc, la probabilité qu'un atome de K_{40} se désintègre est de $\frac{1}{2}$ durant cette période de temps. On comprend que l'immense majorité des atomes de K_{40} présents dans l'organisme à un instant donné sera évacuée biologiquement, par la voie urinaire, sans avoir émis la moindre radiation ionisante. Pour avoir une idée de ce qui signifie « immense majorité », rappelons que le « la densité du flux radioactif », par raccourci et improprement appelée « concentration », du K_{40} est de 50 Bq/kg. En d'autres termes, 50 atomes de K_{40} se désintègrent en moyenne chaque seconde dans chaque kg de notre corps. La masse correspondante de K_{40} vaut 1,9 mg, ce qui signifie que 28,6 milliards de milliards d'atomes de ce radio-isotopes sont présents, uniformément distribués avec 2 g de potassium stable, dans chaque kilo du corps humain.

Les mêmes considérations valent pour le Cs_{137} dont la période radioactive de 30 ans conduit à associer une masse de 1 milliardième de gramme, soit 4,39 milliers de milliards d'atomes, à une radioactivité de 3 200 Bq. Le césium radioactif ne se distingue pas de son homologue naturel stable, Cs_{133} , dont la concentration corporelle est de l'ordre de 10 μ g. Cette concentration est plusieurs milliers de fois supérieure aux ordres de grandeur des contaminations trouvées couramment dans l'organisme des habitants des régions contaminées par les retombées de Tchernobyl.

On ne saurait donc, comme certains l'ont fait, incriminer les propriétés chimiques du Cs_{137} , strictement identiques à celles du Cs_{133} stable, dans la survenue de maladies reliées à la présence du premier dans l'organisme.

Les mesures de la radioactivité corporelle du Cs_{137} ont montré que la période biologique du césium dépend de l'âge et du sexe, 20 jours chez le nourrisson et jusqu'à 150 jours chez l'adulte mâle. **En moyenne, la période biologique des isotopes du césium dans l'organisme humain a une valeur de l'ordre de 100 jours, soit cinq fois plus que celle du potassium !**

Cette réalité contredit l'idée que, parce que lui aussi monovalent (un seul électron sur sa couche externe), le césium se comporterait comme le potassium dans l'organisme humain. À ces différences de période biologique correspondent certainement des répartitions différentes des deux éléments dans les organes du corps humain. Le fait a été établi chez les rongeurs [xx] et a reçu des confirmations chez l'Homme et chez l'Enfant [xxx].

Ces deux éléments ont un diamètre atomique équivalent, 2,43 nm pour le potassium et 2,60 nm pour le césium. Ils se distinguent essentiellement par leur énergie de première ionisation, celle qui est nécessaire pour leur arracher l'unique électron de leur couche électronique périphérique :

- 4,34 eV pour le potassium ;
- 3,89 eV pour le césium (la plus faible de tous les éléments de la table de Mendeleiev).

La différence peut paraître faible dans l'absolu : 10,3%. Il n'en est rien car ce qui compte en l'occurrence est l'écart avec l'énergie de première ionisation du sodium. Cet écart va conditionner les cinétiques des deux pompes, sodium-potassium et sodium-césium. En fait il s'agit de la même pompe, le processus biochimique qui contrôle la concentration du potassium dans les tissus par des échanges d'ion avec le sodium. Or l'énergie de première ionisation du sodium vaut 5,12 eV. Ainsi les écarts sont de 15,2% dans le cas du potassium et 24,0% dans celui du césium, soit une différence relative de 58%. On conçoit alors qu'un ion césium incorporé dans une cellule soit plus difficilement mobilisé qu'un ion potassium. Les échanges d'ions entre sodium et potassium vs sodium et césium suivent donc deux cinétiques sensiblement différentes, rapide pour le potassium à laquelle correspond la période biologique de 20 jours, et lente pour le césium à laquelle correspond la période biologique de 100 jours.

De ces considérations on conclut :

– la toxicité du radio-césium ne peut être imputée à ses propriétés chimiques puisque sa concentration dans l'organisme est des centaines à des milliers de fois inférieure à celle du césium stable naturellement présent ;

– son énergie de première ionisation, la plus faible de tous les éléments, est à l'origine de sa longue période biologique et de l'hétérogénéité très marquée de sa répartition — différente de celle du potassium — dans les organes.

2. Désintégrations des isotopes K_{40} et Cs_{137} : des différences conséquentes.

Le K_{40} se désintègre selon deux schémas :

- $K_{40} \longrightarrow Ca_{40} + e^- + \nu_e$ (max = 1,311 MeV) à 88,8%, désintégration β ;
- $K_{40} + e^- \longrightarrow A_{40} + \nu_e \longrightarrow A_{40} + \nu_e + \text{gamma}$ (1,505 MeV) à 11,2% ;

Le Cs_{137} se désintègre selon deux schémas :

- $Cs_{137} \longrightarrow Ba_{137m} + e^- + \nu_e$ (max = 0,512 MeV), à 95%, désintégration β ;
- puis : $Ba_{137m} \longrightarrow Ba_{137} + \text{gamma}$ (0,662 MeV), période 153 secondes ;
- $Cs_{137} \longrightarrow Ba_{137} + e^- + \nu_e$ (max = 1,174 MeV), à 5%, désintégration β ;

Des différences conséquentes entraînent des conséquences différentes. Nous limitons cette analyse à l'absorption de l'énergie des désintégrations par les tissus mous de l'organisme, assimilables à l'eau pour ce qui est de l'atténuation des rayons gamma et des ionisations produites par les rayonnements β .

2.1. Rayons gamma.

Les rayonnements gamma (des photons de haute énergie) interagissent avec la matière le long de leur trajectoire selon un processus aléatoire représenté par une fonction exponentielle caractérisée par une constante d'espace, ou coefficient d'absorption. La valeur de ce coefficient dépend de l'énergie du photon gamma (voir Annexe 1). Les valeurs de ce coefficient pour le Cs_{137} et le K_{40} sont : $\mu_{Cs_{137}} = 0,0846 \text{ cm}^{-1}$; $\mu_{K_{40}} = 0,0576 \text{ cm}^{-1}$.

Ce qui signifie que 63,22% des photons émis sont absorbés dans les sphères centrées au point d'émission et de rayons $1/\mu_{Cs_{137}}$ et $1/\mu_{K_{40}}$, respectivement 8,19 cm et 12,03 cm.

La loi d'atténuation est représentée par : $E(x) = E_0 e^{-(\mu x)}$ où E_0 est l'énergie d'émission du photon.

Cependant, l'information utile n'est pas l'énergie résiduelle du photon à la distance x de la source, mais la part absorbée dans un volume élémentaire ΔV : $\Delta E(x) = \mu E_0 e^{-(\mu x)} \Delta V$

De plus il faut tenir compte du pourcentage de désintégrations conduisant à l'émission d'un photon gamma, 95% pour le Cs_{137} , mais seulement 11,2% pour le K_{40} .

Le graphique ci dessous représente en coordonnées semi-logarithmiques les fonctions absorptions du Cs_{137} et du K_{40} , pondérées par la probabilité d'émission d'un photon gamma :

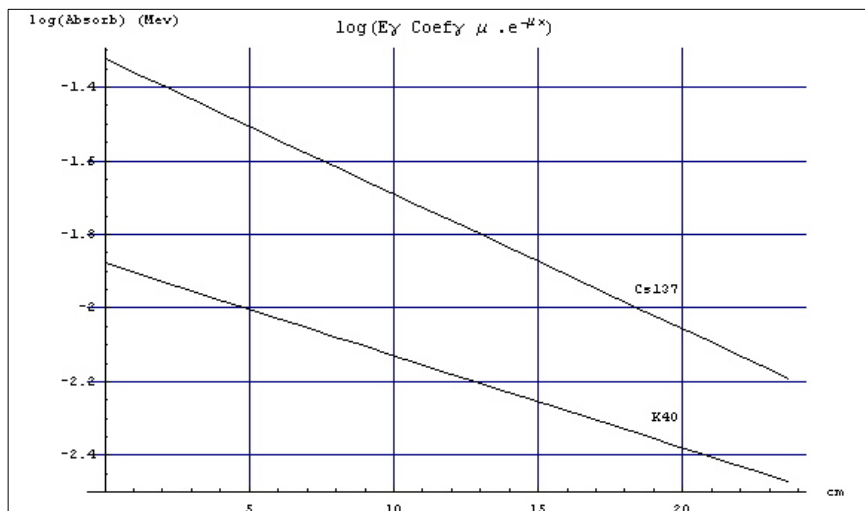


Fig 1. Énergie absorbée (log) en fonction de l'éloignement de la source, valeur moyenne pour une désintégration.

Le rapport moyen entre l'absorption des énergies du K_{40} et du Cs_{137} est au départ de 3,73 en faveur du

second mais tend à diminuer en fonction de l'éloignement d'avec la source, passant par exemple à 2 aux environs de 25 cm.

Cependant la probabilité qu'un photon passe en un point déterminé à la distance x du point d'émission est faible : la trajectoire du photon est aléatoirement distribuée dans toutes des directions. **On doit raisonner en moyenne, soit en considérant un temps très long au cours duquel une grande quantité de photons sera émise, soit en exprimant la densité d'énergie absorbée, relative à l'émission d'un photon, traversant la surface de la sphère de rayon x (voir graphique ci dessous).**

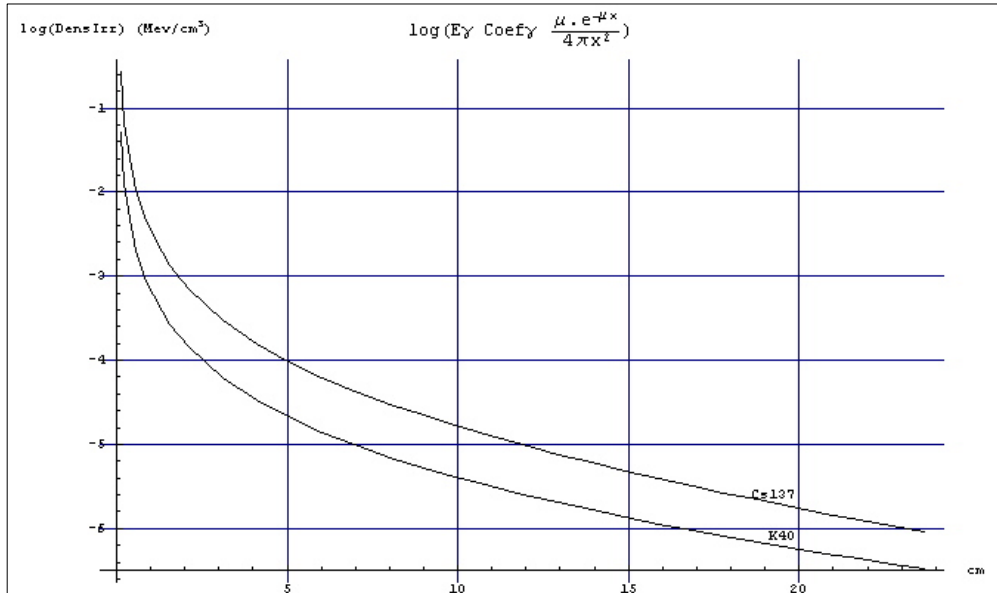


Fig 2. Densité d'énergie absorbée (log) en fonction de l'éloignement de la source, valeur moyenne pour une désintégration.

L'irradiation gamma interne produite par un volume élémentaire dans un autre volume élémentaire diminue donc très rapidement en raison des deux phénomènes directement fonctions de la distance : l'atténuation de l'énergie moyenne des désintégrations et leur dilution dans un volume de plus en plus grand. L'effet résultant en un point donné constitue la relation de base exprimant la densité d'énergie déposée par un volume élémentaire situé à une distance x .

La somme, durant un temps déterminé, par calcul intégral, des densités correspondant aux émissions de chaque point du corps radioactif source de l'irradiation représente l'énergie absorbée par unité de volume durant ce temps. Cette méthode de calcul sera appliquée ci-dessous au chapitre 3 à un modèle géométrique simplifié du cœur humain pour calculer l'irradiation qu'il subit du fait de la présence naturelle du K_{40} dans le muscle cardiaque et celle, rajoutée, en cas de contamination par du Cs_{137} .

Les rayonnements gamma interagissent avec la matière en arrachant des électrons aux couches périphériques des atomes, d'où des cascades d'ionisations dépendant de l'énergie absorbée.

2.2. Rayons β .

L'énergie d'une désintégration β se partage entre celle, cinétique, emportée par l'électron, celle de recul du noyau, et celle d'un neutrino, qui est « perdue » puisque les neutrinos n'interagissent quasiment pas avec la matière. De ce fait, l'énergie d'un rayon β est en moyenne de 40% de sa valeur maximale, celle donnée dans les schéma de désintégration ci-dessus.

Un schéma simplifié des trajectoires des particules β est présenté en Annexe 2. Les valeurs données de la vitesse des électrons correspondent à ceux d'énergie maximale, tandis que celles de leur longueur de pénétration L_p et de la distance parcourue D_p sont relatives à ceux d'énergie proche de la valeur maximale. Pour cette dernière les valeurs à retenir sont :

- $L_{pmaxCs137} \sim 2,2$ mm et $D_{pmaxCs137} \sim 6,6$ mm ;
- $L_{pmaxK40} \sim 5,2$ mm et $D_{pmaxK40} \sim 15,6$ mm.

Les valeurs moyennes s'en déduisent en multipliant par 0,4 L_p et D_p :

- $L_{pmoyCs137} \sim 0,88$ mm et $D_{pmoyCs137} \sim 2,46$ mm ;
- $L_{pmoyK40} \sim 2,1$ mm et $D_{pmoyK40} \sim 6,3$ mm.

Une particule β laisse un sillage de molécules ionisées tout au long de sa trajectoire, de l'ordre de 10

ionisations par micromètre. Ces ionisations induisent des réactions chimiques conduisant à la formation de radicaux libres et à des composés chimiques oxydants. Les interactions produisent également des rayons X de freinage lorsque l'électron est fortement dévié par son passage près d'un noyau (charge positive).

On conçoit que l'auto-irradiation d'un organe par les rayonnements β des radionucléides qu'il contient dépende de sa géométrie. S'il est massif avec une dimension minimale de plusieurs cm, on pourra considérer qu'il absorbe tout son rayonnement β interne. S'il est mince, comme la paroi du ventricule droit (environ 3,3 mm chez l'adulte), alors une part significative de l'énergie sera déposée au voisinage de l'organe.

Ces considérations sont relatives aux différents émetteurs β présents. Dans un organe donné, ayant une longueur de pénétration inférieure, le rayonnement β du Cs_{137} sera plus absorbé que celui du K_{40} .

3. Modélisation de l'irradiation gamma du cœur humain.

Youry Bandazhevsky et Galina Bandazhevskaya ont montré qu'il y avait une étroite corrélation entre la présence de Cs_{137} dans l'organisme des enfants et la survenue de pathologies cardiaques. La gravité du tableau est intrigante car il n'est pas évident que la seule radioactivité ajoutée à celle du K_{40} soit à incriminer. L'analyse du chapitre 1 ne laisse guère de place au doute : la radioactivité est le facteur dominant. Par son effet physique direct, que nous allons évaluer ; mais aussi, peut-être, par l'ensemble des perturbations biologiques que l'incorporation de Cs_{137} provoque (Bandazhesky & al. 1995 []), un domaine où nous ne nous risquerons pas.

L'énergie déposée par les rayonnements gamma de césium et du potassium est, on l'a vu, calculable avec un schéma assez simple, même si dispendieux en temps calcul. On visera un résultat indicatif permettant de distinguer les différences entre les effets des deux radio-éléments et de chiffrer aussi, pour la même concentration des radioéléments, la sur ou sous irradiation du cœur de l'enfant par rapport à l'adulte. La géométrie du cœur étant modifiée au cours du cycle, on mènera les calculs dans les deux configurations opposées, celle de la diastole où le cœur a son volume maximal et celle de la systole où ce dernier est minimal. L'irradiation moyenne sera à pondérer par la durée relative de chaque phase du cycle : 2/3 pour la diastole et 1/3 pour la systole.

3.1. Modèle géométrique simplifié.

On se donne un modèle ultra simplifié, en vue d'obtenir des résultats numériques avec des moyens limités. Le cœur est représenté par un volume ayant une symétrie de révolution. Pour simplifier encore, il est de symétrie sphérique en phase de diastole alors que la contraction des deux ventricules en phase de systole est simulée par un ellipsoïde de révolution, par aplatissement de la sphère. Cet aplatissement est symétrique pour tenir compte du fait que chaque ventricule éjecte une quantité identique de sang durant cette phase. À ce stade on ignore le cloisonnement entre ventricule et oreillette, et les myocards, droit et gauche, sont représentés par des demi-sphères (ou des demi-ellipsoïdes en phase de systole) accolées à la paroi centrale, le septum, figurée par une galette circulaire occupe le grand cercle « équatorial ».

Les deux schéma ci-dessous, figure 3, précisent la disposition des éléments dans les deux phases de diastole et systole, avec la symétrie de révolution autour de l'axe z .

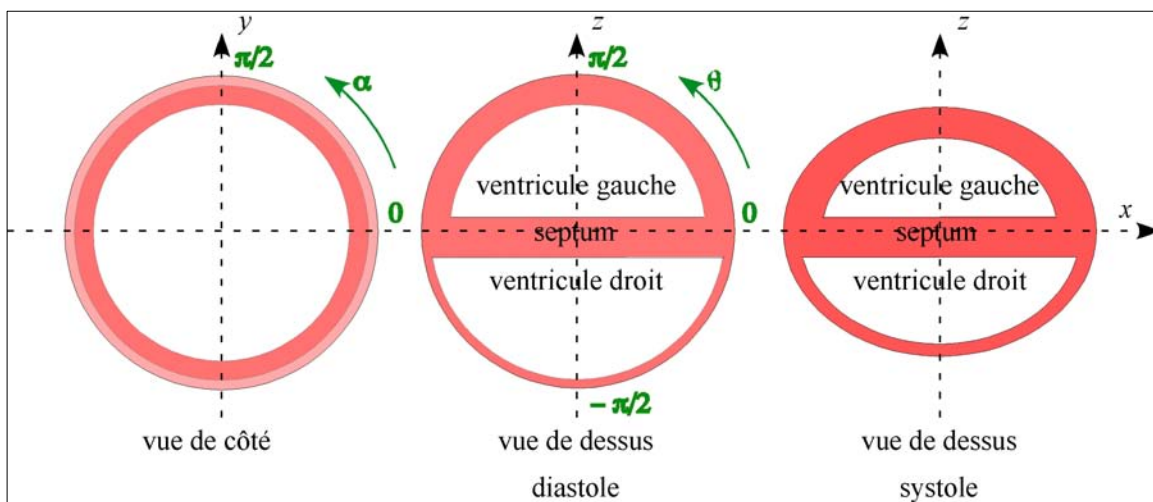


Fig 3. Modèle géométrique simplifié du cœur.

Les hypothèses pour le dimensionnement sont les suivantes :

– la masse de muscle est équivalente à celle d'un cœur, autour de 300 g dans le cas d'un adulte, environ la

moitié dans le cas enfant (en fait 318 g et 172 g, respectivement, avec les dimensions ci-dessous, en supposant une densité de 1) ;

- l'épaisseur du myocarde gauche vaut 10 mm (adulte) et 8 mm (enfant) ;
 - l'épaisseur du myocarde droit vaut 3,3 mm (adulte) et 2,66 mm (enfant) ;
 - l'épaisseur du septum vaut 13 mm (adulte) et 10,4 mm (enfant) ;
 - le septum est disposé pour respecter les différences normales de volume entre les deux ventricules ;
 - le rayon externe de la sphère (phase diastolique) vaut 55 mm (adulte) et 45 mm (enfant) ;
 - la demie-hauteur de l'ellipsoïde (phase systolique) vaut 42,4 mm (adulte) et 35,5 mm (enfant) ;
 - l'épaisseur des muscles contractés est telle que leur masse n'est pas modifiée ;
 - les portions d'ellipsoïde sont homothétiques (pour un schéma de calcul facile à paramétrer).
- La valeur du volume de sang sortant de chaque ventricule au moment de la diastole se situe entre 70 et 80 cm³ (la moitié chez un enfant). On a adopté une valeur plus élevée de 50%, 120 cm³ chez l'adulte, pour tenir compte du volume des oreillettes, non représentées dans ce modèle simplifié. On cherche à caractériser l'irradiation de l'organe durant le cycle, et non un résultat d'une précision incontestable.

3.2. Schéma du calcul.

L'exploitation de la symétrie sphérique peut être illustrée par la figure 4 ci-dessous :

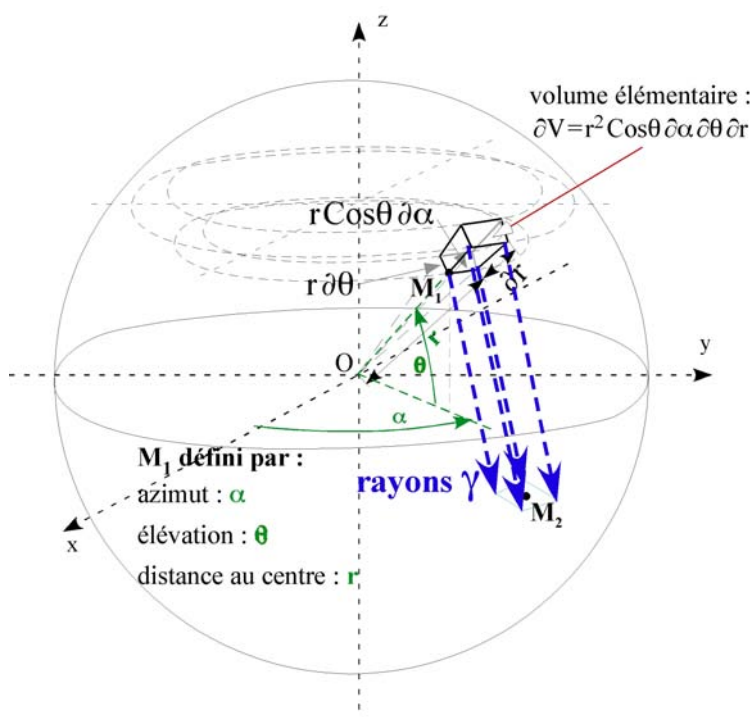


Fig 4. schéma de discrétisation du calcul de l'irradiation

Ce schéma est très classique. On considère le rayonnement émis par le volume élémentaire défini par les accroissements dr , $r \cos \theta d\alpha$ et $r d\theta$ à partir du point M_1 . On en calcule la fonction d'absorption en tout point selon la formule donnée dans la figure 2.

Cette fonction n'est pas intégrable au sens où il n'existe pas de fonction analytique dont elle dérive. On doit donc recourir à une intégration numérique.

La symétrie de révolution s'applique à la densité de rayonnement en tout point. Il suffit donc de calculer les valeurs de cette fonction en tout point dans un plan de coupe contenant l'axe Oz de symétrie.

La vue de la figure 3 représente la coupe équatoriale du volume d'intégration où se situent les points M_1 , sources élémentaires de rayonnement. On calculera les valeurs de la densité d'irradiation en chaque point M_2 , défini par une distance au centre r_2 et une élévation θ_2 , dans un plan de coupe vertical du myocarde droit.

Les résultats obtenus dans les différents cas de figure : adulte ; enfant ; ^{137}Cs ; ^{40}K ; systole ; diastole, d'où l'on tirera des conclusions générales sur l'irradiation du muscle cardiaque.

4. Résultats numériques ; interprétation.

Les données de base du calcul sont :

- durée considérée, un an, soit 31 536 000 secondes, ce qui garantit l'homogénéisation de l'absorption d'énergie dans les tissus ;
- concentration des radionucléides : 200 Bq/kg pour le ^{137}Cs et 60 Bq/kg pour le ^{40}K (l'irradiation étant proportionnelle à la concentration, les résultats pour des valeurs différentes de cette dernière se déduisent par simple règle de 3) ;
- seule l'irradiation du myocarde droit est évaluée (c'est le moins irradié car de sa faible épaisseur découle une auto-irradiation moindre) ;
- la comparaison entre irradiation par le ^{137}Cs et le ^{40}K est effectuée dans la phase de diastole ;
- les valeurs des densités d'irradiations en chaque point sont exprimées en mGy ($\mu\text{J/g}$) ou μGy (nJ/g) ;

4.1. Comparaison ^{137}Cs – ^{40}K (évaluée dans la phase de diastole, à pondérer : modèle sphérique)

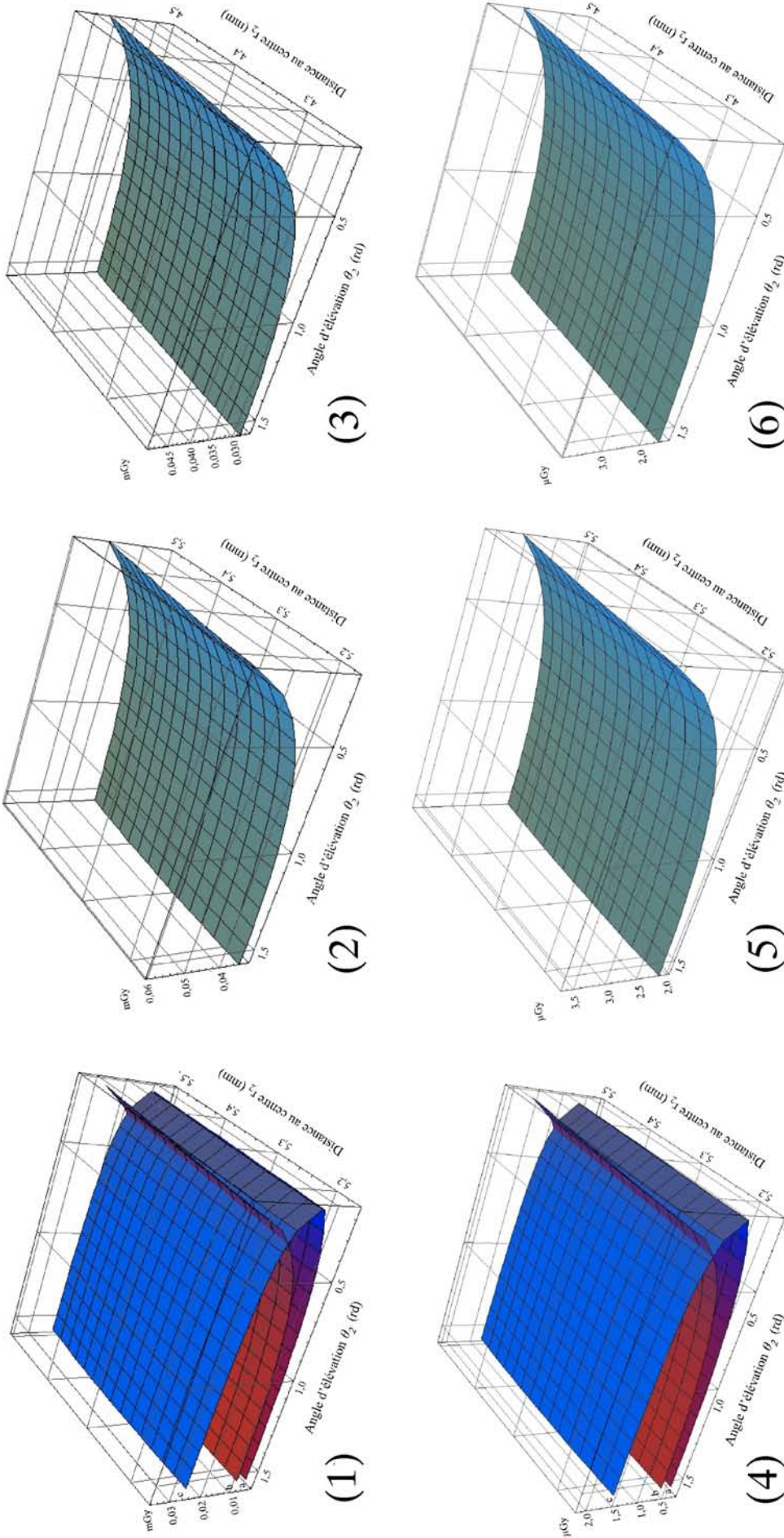


Fig 5. Cartographie de la densité d'irradiation annuelle du myocarde droit dans différents cas

- (1) Cs_{137} adulte : a = part du myocarde gauche ; b = part du septum ; c = auto-irradiation du myocarde droit
- (2) Cs_{137} adulte : irradiation totale du myocarde droit
- (3) Cs_{137} enfant : irradiation totale du myocarde droit
- (4) K_{40} adulte : a = part du myocarde gauche ; b = part du septum ; c = auto-irradiation du myocarde droit
- (5) K_{40} adulte : irradiation totale du myocarde droit
- (6) K_{40} enfant : irradiation totale du myocarde droit

4.2. Cs_{137} : comparaison adulte-enfant (phase de systole, à pondérer : modèle ellipsoïdal)

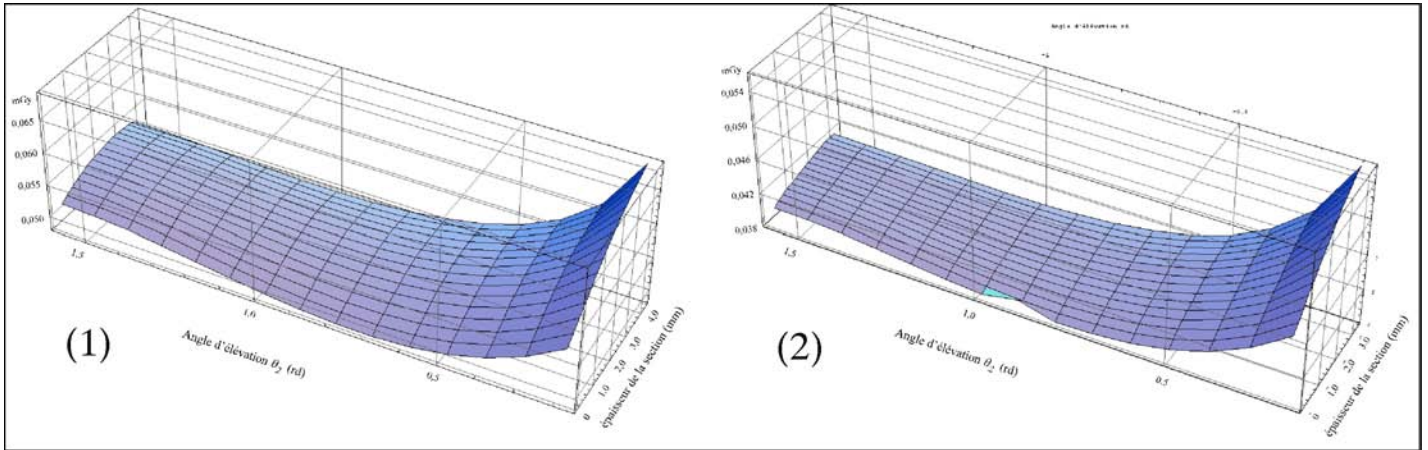


Fig 6. Cartographie de la densité d'irradiation annuelle du myocarde droit en phase de systole.

(1) adulte

(2) enfant

4.3. Interprétation

On constate qu'une contamination modérée du muscle cardiaque par le Cs_{137} (200 Bq/kg) produit une irradiation gamma très supérieure (de l'ordre de 15 fois) à celle due au K_{40} naturel (60 Bq/kg).

L'irradiation gamma du cœur de l'enfant est inférieure (d'environ 40%) à celle de l'adulte.

L'auto-irradiation du myocarde est plus élevée durant la systole à cause de l'applatissage du muscle : pur facteur géométrique. Cependant, rapporté à la durée moitié de cette phase par rapport à la diastole, l'effet est assez marginal.

Pour fixer les idées, l'irradiation moyenne (diastole-systole) est minimale aux pôles, selon la représentation géométrique simple adoptée, et maximale dans la zone équatoriale, celle où se situe le septum. La différence entre ces extrema est de l'ordre de 40%.

Les valeurs se répartissent dans l'intervalle 0,03 à 0,07 mGy/an pour la concentration de 200 Bq/kg.

L'énergie gamma émise en un an par le Cs_{137} à cette concentration vaut 0,568 mJ/kg ; où l'on constate que le cœur en absorbe un peu moins de 10%. Le reste est pour partie dissipé dans le reste de l'organisme, à commencer par le flux sanguin, et pour le reste, comme on sait, rayonné hors du corps.

5. Énergie des rayonnements β .

On suppose en première approximation que 90% du rayonnement β du Cs_{137} est absorbée par le tissu musculaire cardiaque, mais que cette proportion n'est que de 80% dans le cas du K_{40} du fait d'une profondeur de pénétration plus grande.

La distribution de cette absorption est en gros homogène, plus faible cependant dans le myocarde droit, nettement moins épais.

Avec ces hypothèses, l'irradiation β du muscle cardiaque par le Cs_{137} (200 Bq/kg) vaut : 0,19 mSv/an ;

Celle par le K_{40} (60 Bq/kg) vaut : 0,12 mSv/an.

Valeurs comparables ici. L'irradiation des tissus musculaires cardiaques par le Cs_{137} est à 80% d'origine β et 20% d'origine gamma. En revanche, celle due au K_{40} , est à plus de 97% d'origine β .

6. Constat.

Y. Bandazhevsky et G. Bandazhevskaya ont déterminé que des pathologies cardiaques chez l'enfant étaient corrélées avec la contamination par le Cs_{137} , et que les troubles apparaissaient de façon statistiquement significative dès que la concentration moyenne dépassait 20 Bq/kg. Par ailleurs des mesures sur des rats ont établi que la concentration du césium dans le muscle cardiaque est d'une dizaine de fois la concentration moyenne dans l'organisme.

Pour ces raisons nous avons mené les calculs d'énergie ionisante dissipée dans le tissu cardiaque pour une concentration en Cs_{137} de 200 Bq/kg.

La majeure partie de cette énergie ajoutée provient du rayonnement β qui fait plus que doubler celui du K_{40} . La proportion ajoutée de rayonnement gamma est sensible mais son poids relatif dans l'irradiation des

tissus est marginale.

Une hypothèse à considérer : 10% du flux sanguin expulsé par le ventricule gauche, le plus irradiant, passe immédiatement dans les artères coronaires. Ce sang contient donc des radicaux oxydants produits par les rayonnements émis par le myocarde. Or les vaisseaux sanguins sont parmi les plus vulnérables aux radiations. On peut donc imaginer que ce mécanisme n'est pas pour rien dans les pathologies cardiaques liées à la présence de Cs_{137} dans l'organisme.

Annexe 1.

Formule empirique donnant le coefficient d'atténuation d'un photon gamma entre 100 keV et 3 MeV ; utilisation.

Yves Lenoir, juin 2013

Introduction

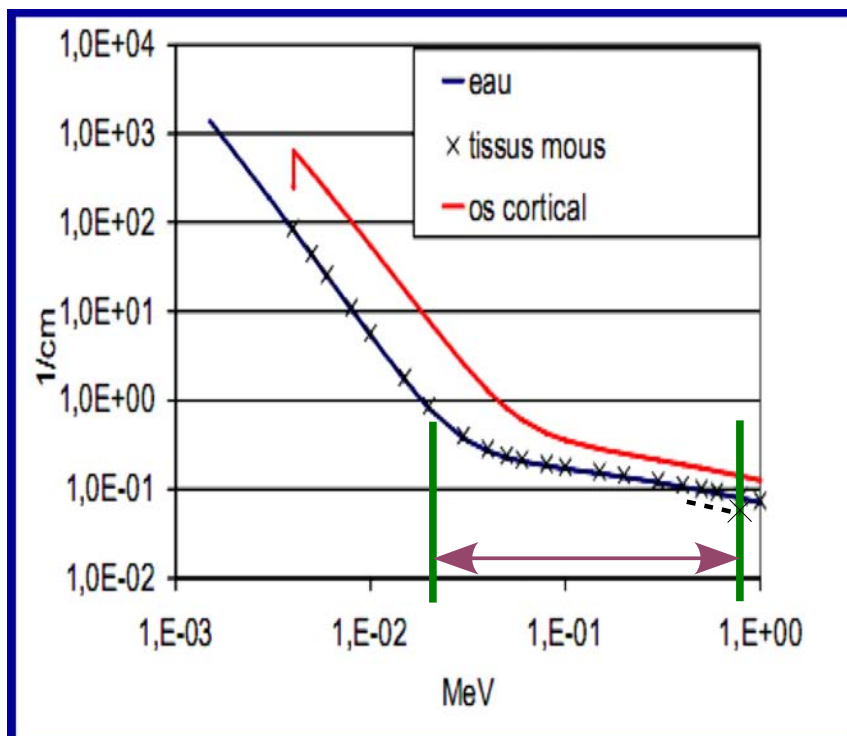
On se propose de fournir une formule simple permettant de calculer pour chaque énergie de désintégration le coefficient d'atténuation d'un photon gamma émis lors du processus de désintégration des radioisotopes laissés dans l'environnement par les explosions et les accidents atomiques.

Ces formules peuvent servir ensuite à évaluer l'énergie déposée par ces photons gamma dans les tissus vivants. On pense ici à différencier l'action des désintégrations du $_{40}K$ naturel et du $_{137}Cs$ artificiel que l'on peut trouver dans le cœur d'une personne contaminée par la chaîne alimentaire.

Données considérées

La courbe log-log du coefficient d'atténuation μ d'un photon gamma dans l'eau (valable pour les tissus mous) et dans les tissus osseux est extraite de la référence suivante (Chapitre IV, *Interactions Rayonnements-Matière*, d'un cours de radioactivité donné à la Faculté des Sciences de Rabat) :

<http://www.fsr.ac.ma/cours/physique/SABIR/Cours%20Phy%20Nu%20Chap%20IV.pdf>



La partie qui nous intéresse est celle avec sa légère concavité vers le haut pour des abscisses d'énergie E dans l'intervalle [0,05 MeV ; 1 MeV]. L'échelle log-log conduirait à placer le point correspondant à 2 MeV à une distance de 0,30103 plus à droite. On couvre ainsi tout le spectre des émissions gamma concernées.

Cette portion de courbe extrapolée jusqu'au point d'abscisse correspondant à 2 MeV peut être approchée par une parabole $y = a + b x + c x^2$, où $y = \log \mu$ et $x = \log E$. Il reste à déterminer les trois coefficients a , b et c (linéariser serait inapproprié car on amplifierait alors les approximations).

Trois points suffisent qui conduiront à trois équations du premier degré à trois inconnues.

Énergie (keV)	100	1000	2000
Coef. D'atténuation (cm ⁻¹)	0.171147	0.0700148	0.0490203
log ₁₀ (Énergie)	2	3	3.301030
log ₁₀ (coef d'atténuation)	- 0.766630	- 1.154810	- 1.309624

Formule empirique valable entre 100 keV et 2000 keV

La résolution du système des trois équations d'inconnues a , b et c donne :

$$a = - 0.567819$$

$$b = 0.094436$$

$$c = - 0.094436$$

La formule empirique applicable pour le coefficient d'atténuation μ dans l'eau et les tissus mous des photons gamma d'énergie E comprise entre 100 keV et 2000 keV est donc la suivante :

$$\log \mu = - 0.567819 + 0.094436 \log E - 0.094436 (\log E)^2$$

où : μ (cm⁻¹) et E (keV)

Rappelons que la valeur de l'énergie résiduelle du photon gamma à la distance x (cm) de la source vaut :

$$E(x) = E e^{-\mu x}$$

La source rayonne en continu dans toutes les directions une puissance de rayonnement proportionnelle à sa quantité de radioactivité Q (en Bq) et de E . L'intensité $I(x)$ du flux de puissance au travers de la surface sphérique de rayon x , dont le centre est la source d'émission vaut donc :

$$I(x) = Q E(x) / 4 \pi x^2$$

La puissance élémentaire ∂W absorbée par un volume élémentaire ∂v (en cm³) centré à la distance x (cm) de la source vaut alors :

$$\partial W(x) = Q E(x) \partial v / 4 \pi x^2$$

Si la demie-vie radioactive du radioélément est longue devant sa demie vie biologique on peut se contenter de garder Q constant dans les calculs. En revanche si cette condition n'est pas vérifiée, le calcul de l'énergie déposée dépend du temps à partir de l'instant considéré comme initial, celui de la contamination initiale par la quantité Q_0 de radioactivité :

$$\partial W(x, t) = Q_0 e^{-t/T} E(x) \partial v / 4 \pi x^2$$

où T est la constante de temps du processus de désintégration, qui se déduit de la demie-vie par la formule :

$$T = t_{1/2} / \text{Log}_e 2 \text{ soit } T = 1.44269 t_{1/2}$$

(Log_e est la fonction logarithmique naturelle appelée aussi logarithme népérien)

Exploitation

Ces quelques formules de base et la formule empirique du coefficient d'atténuation permettent de calculer aisément l'énergie déposée dans une portion de tissus mou d'un organisme humain en fonction de la distribution des radioéléments émetteurs gamma présents dans l'organisme.

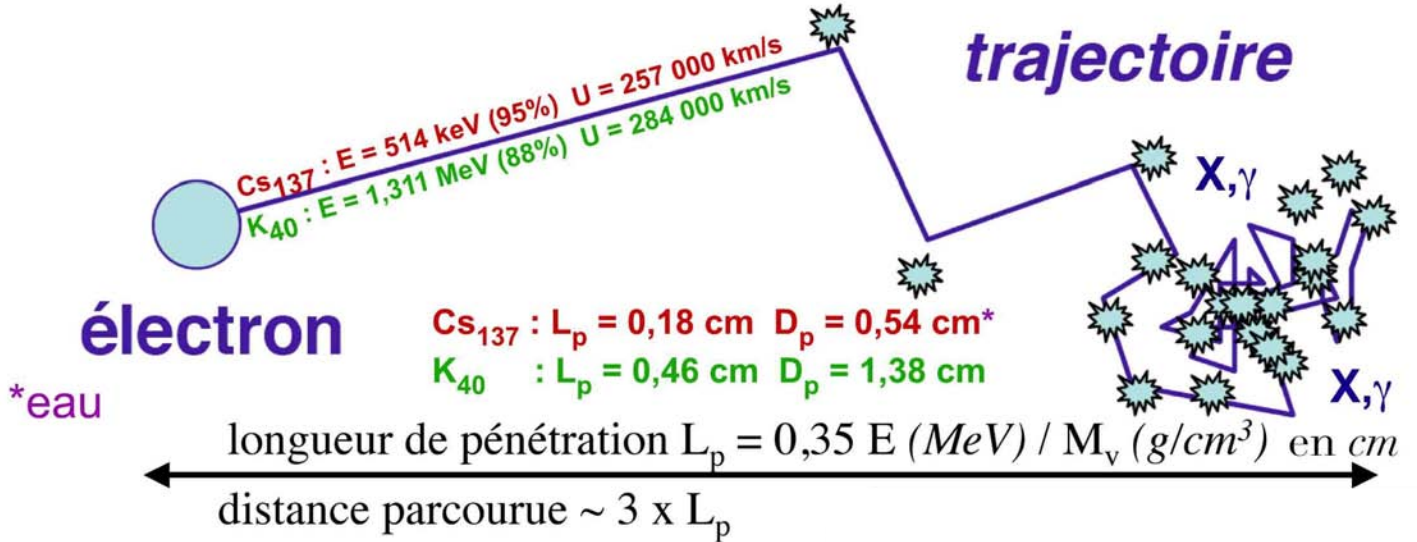
La méthode à employer est classique, le calcul intégral en temps et en espace, dont on trouve des solutions primitives standards sur les sites *open source* du Net. On peut aussi faire appel à des logiciels mathématiques comme *Mathematica* ou *Matlab* (payants) et programmer sans difficulté des schéma assez complexes.

On se rendra alors compte des différences des effets des doses déposées dans les organes selon la distribution des émetteurs gamma naturels et artificiels présents dans l'organisme.

Annexe 2.Schéma de désintégrations β :

AVANT : l'atome instable se comporte comme son isotope stable par exemple, Cs_{137} comme Cs_{133} ; I_{131} comme I_{127}

APRÈS : émission d'une particule β (cas considéré, Cs_{137})

**Annexe 3.**Programmation des calculs sous *Mathematica*à titre d'information sur demande à yaj.lenoir@free.fr