

ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DES DOSES AUTOUR DE SOURCES PONCTUELLES ALIGNÉES

Application en curiethérapie gynécologique

par

A. DUTREIX et A. WAMBERSIE

Le remplacement progressif du radium par d'autres radioéléments a permis de rénover les techniques d'application des sources radioactives et notamment de développer les méthodes de préparation inactive.

Simultanément et pour faciliter l'utilisation de ces techniques, on a mis au point des sources de forme et de dimensions très différentes. Ainsi certains auteurs (CARDIS 1968, C. E. A. 1966) proposent des sources de césium 137 sous formes de petites sphères ou de grains qui peuvent être assimilés à des points et que nous appellerons par convention 'sources ponctuelles'.

Les radiothérapeutes, avant d'utiliser ces sources dans des applications pour lesquelles ils ont une grande expérience du radium désirent savoir à quelles modifications ils peuvent s'attendre dans la répartition des doses. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des applications gynécologiques pour lesquelles les techniques utilisant les tubes de radium sont bien codifiées et donnent d'excellents résultats cliniques.

Nous avons entrepris l'étude de la répartition des doses dans ce cas mais la plupart de nos conclusions sont valables pour d'autres applications.

Soumis à la Rédaction 13 Mai 1968.

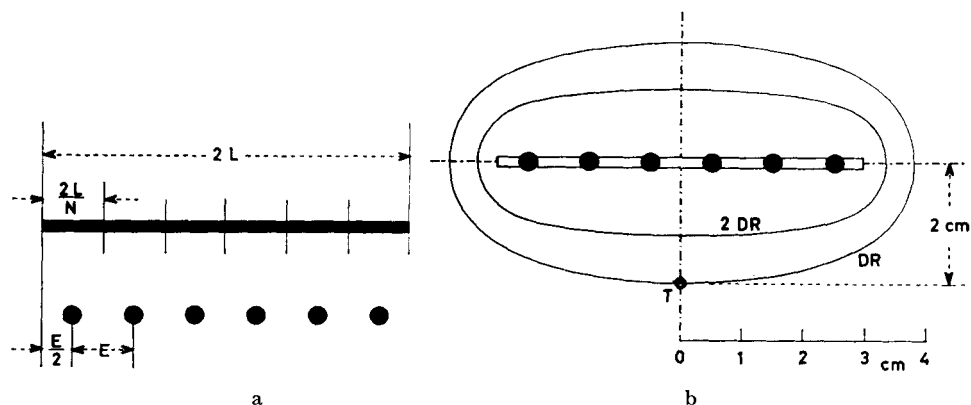


Fig. 1. Comparaison de sources ponctuelles alignées et d'une source rectiligne continue. a) Disposition des sources ponctuelles équivalente à la source continue. b) La dose de référence DR est définie au point T .

Le calcul de la dose par les méthodes manuelles est extrêmement long et fastidieux et rend difficile toute étude systématique mais nous disposons pour ce travail d'un programme de calcul sur ordinateur (DUTREIX 1967). (Nous tenons à remercier le Centre de Calcul de l'Université de Louvain qui a fort obligeamment mis à notre disposition son calculateur (IBM 360—40) pour cette étude.)

Dans une première partie, nous avons recherché la disposition des sources ponctuelles qui permet d'obtenir une répartition des doses aussi semblable que possible à celle correspondant à une source continue, cela pour répondre à la demande de certains curiethérapeutes.

Nous avons toutefois négligé pour cette comparaison l'autoabsorption dans la source continue, en considérant que la diminution de dose qu'elle entraîne à l'extrémité des sources n'est jamais souhaitable et qu'il serait donc illogique de chercher à la reproduire avec un autre dispositif.

Dans une deuxième partie nous avons cherché à établir des règles simples permettant de calculer la valeur de la dose en un point de référence et de prévoir les dimensions des isodoses en fonction du nombre de sources et de leur disposition.

Nous avons enfin étudié l'influence sur la forme des courbes isodoses d'un espacement irrégulier des sources.

I. Equivalence entre une source rectiligne continue et des sources ponctuelles

Il est évident que la répartition de la dose autour de sources ponctuelles alignées est d'autant plus semblable à celle autour d'une source continue

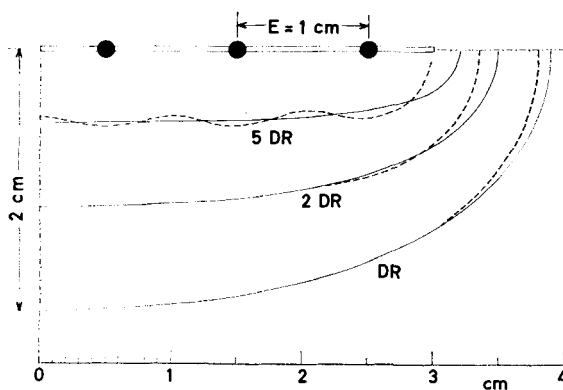


Fig. 2. Distribution comparée des doses autour d'une source rectiligne continue de 6 cm de longueur radioactive et de 6 sources ponctuelles alignées espacées de 1 cm.

que l'espacement entre les sources est plus faible (c'est-à-dire le nombre de sources ponctuelles plus élevé) et que la distance à l'axe de ces sources est plus grande.

Considérons (Fig. 1) une source radioactive rectiligne continue de longueur active $2L$ cm et d'activité Q mCi que l'on décompose en N éléments égaux de longueurs $2L/N$. On peut remplacer chacun de ces N éléments par une source ponctuelle placée en son centre et d'activité Q/N mCi; les N sources ponctuelles sont ainsi régulièrement réparties et l'espacement E entre deux sources est égal à $2L/N$.

Nous avons fait varier cet espacement entre les sources de 0,5 à 2 cm. Pour des espacements inférieurs à 0,5 cm, il est difficile de mettre en évidence des différences de répartition des doses même à quelques millimètres de l'axe des sources; pour des espacements supérieurs à 2 cm, les variations de doses même à grande distance de l'axe deviennent trop importantes.

Pour inclure largement dans cette étude tous les types de sondes utilisés en gynécologie, nous avons délibérément fait varier les longueurs actives au-delà des limites usuelles et le calcul a été effectué pour des sources de longueur active variant de 4 à 12 cm.

Toutes les doses ont été estimées en fonction de la dose DR en un point de référence. Ce point de référence T est situé dans le plan perpendiculaire à l'axe de la source en son centre et à 2 cm de cet axe.

Le volume traité est le volume de tissu limité par l'isodose dont la valeur est égale à celle de la dose DR au point T .

Le volume de surdosage (2 DR) est le volume de tissu limité par l'isodose dont la valeur est égale à 2 fois celle de la dose DR au point T . De même on peut également définir des volumes de surdosage 3 DR , 4 DR etc. . . .

Par convention on appelle:

Longueur d'un volume, la dimension de ce volume mesurée dans la direction de l'axe de la sonde;

Rayon de ce volume, le rayon de l'isodose circulaire mesuré dans un plan perpendiculaire à l'axe de la sonde à une distance définie du centre de la sonde.

L'analyse des résultats des calculs effectués pour les différentes longueurs actives et pour les différents espacements entre les sources nous a permis de comparer de façon précise les volumes précédemment définis et d'en tirer les conclusions suivantes (Fig. 2).

1. Volume traité

A. Rayon. Dans tous les cas envisagés dans cette étude, source continue ou sources ponctuelles, on peut admettre que le rayon du volume traité décroît régulièrement quand on se déplace du centre de la sonde vers une extrémité.

Le calcul montre que le rayon de ce volume à une distance définie du centre est indépendant de l'espacement entre les sources, tant que cet espacement est inférieur à 2 cm; il est égal au rayon du volume correspondant à une source continue.

Le rayon du volume traité dépend très peu de la longueur de la source: au centre de la source, il est égal à 2 cm par définition; à une distance $L/2$ du centre, il est égal à 1,9 cm; à une distance $3L/4$ du centre, il est égal à 1,8 cm pour une source de 4 cm de longueur et à 1,7 cm pour une sonde de 12 cm.

Quand on passe d'une source continue de 12 cm de longueur à 6 sources ponctuelles espacées de 2 cm, la diminution du rayon n'est que de 1 mm même à 6 cm du centre, c'est-à-dire au niveau de l'extrémité de la partie active de la source continue.

B. Longueur. La longueur du volume traité est légèrement plus petite lorsque l'on passe d'une source continue à des sources ponctuelles. Elle diminue lorsque le nombre de sources diminue. La variation maximale observée est de 5 mm lorsque l'on passe d'une source continue de 12 cm à 6 sources espacées de 2 cm.

2. Volume surdosé

A. Rayon. Lorsque l'on considère des isodoses plus proches de la sonde (de valeurs 2 DR, 3 DR, 4 DR) la forme de ces courbes peut être assez différente dans le cas d'une source continue et dans le cas de sources ponctuelles.

En effet, pour une source continue le rayon du volume surdosé décroît constamment du centre vers les extrémités alors que pour des sources ponctuelles il passe par une série de maximums et de minimums qui sont d'autant plus accentués que la valeur de l'isodose est plus grande et que les sources sont plus espacées.

Dans le cas de l'isodose 2 *DR*, l'amplitude de la variation du rayon du volume surdosé est pratiquement indépendante de l'espacement entre les sources.

Ainsi pour une source continue de 12 cm de long, le rayon décroît de 11 mm à 10 mm lorsque l'on s'éloigne du centre à 0,75 *L*; dans le cas de 6 sources espacées de 2 cm, la variation correspondante du rayon est de 12 à 9 mm.

De même si l'on compare une source continue de 4 cm et 3 sources espacées de 1,33 cm, le rayon varie de 13 à 11 mm dans les deux cas.

B. Longueur. Les variations de la longueur du volume surdosé sont très semblables à celles observées pour la longueur du volume traité.

On peut en déduire que malgré les variations de la forme du volume surdosé en fonction du nombre de sources, le volume de tissus surdosé est pratiquement constant; il a même tendance à décroître légèrement lorsque le nombre de sources diminue.

Des conclusions semblables pourraient être tirées pour le volume surdosé 3 *DR*.

3. Dose au contact de la sonde

La dose au contact de la sonde a été étudiée pour des diamètres de sonde de 4 mm, 6 mm et 8,5 mm et pour des longueurs de 4 à 12 cm.

Cette dose, qui est toujours très élevée du fait de la faible distance de la source, est uniforme tout le long de la sonde dans le cas d'une source continue mais présente des maximums et des minimums très accentués dans le cas de sources ponctuelles.

Cependant la dose minimale ne doit pas être trop faible pour éviter un sous-dosage des tissus et la dose maximale ne doit pas être délivrée à un volume trop important à cause des risques de nécrose.

La dose minimale au contact diminue au contact de la sonde évidemment lorsque le diamètre de la sonde augmente, mais même pour une sonde de 8,5 mm de diamètre, quelle que soit sa longueur et le nombre de sources ponctuelles, la dose minimale est au moins égale à 3 fois la dose de référence au point *T*.

Tableau 1
Dimensions du volume traité

Nombre de sources	Espacement	Volume traité	
		Longueur ¹ calculée	Longueur réelle
4	1	5,5	5,88
4	2	9	9,06
5	0,8	5,6	5,9
5	1	6,5	6,7
5	1,6	9,2	9,22
5	2	11	10,96
6	1	7,5	7,58
6	1,33	9,33	9,32
6	2	13	12,96
8	0,5	5,75	5,98
8	1	9,5	9,46
8	1,5	13,25	13,12
8	2	17	16,84
10	0,8	9,6	9,54
10	1,2	13,4	13,22

¹ Par la formule empirique (1)

Ainsi, si on délivre 5 000 rad en T , la dose à la paroi de la sonde est au minimum égale à 15 000 rad et aucun sous dosage n'est à craindre.

La dose maximale au contact de la sonde est déterminée davantage par le diamètre de celle-ci que par le nombre de sources. Ainsi pour une source continue de 6 cm, et pour une dose de 5 000 rad en T , la dose au contact de la sonde passe de 34 000 rad pour une sonde de 8,5 mm de diamètre à 71 000 rad pour une sonde de 4 mm de diamètre. Si on remplace la source continue par quatre sources espacées de 1,5 cm, la dose maximale atteint 49 000 rad pour un diamètre de 8,5 mm et 174 000 rad pour un diamètre de 4 mm.

A partir du moment où la limite de tolérance des tissus est dépassée la valeur de la dose a moins d'importance que la masse de tissus à laquelle cette dose est délivrée. Or, nous venons de voir que les volumes de tissus surdosés étaient très semblables pour les sources continues ou ponctuelles.

Tableau 2*Doses en rad/jour à 2 cm de sources de césium ponctuelles alignées*

n	Espacement cm						
	0	0,5	0,8	1	1,2	1,5	2
1	190,8						
2	381,6	378,7	369,7	361,9	352,8	337,2	306,5
3	572,4	554,4	523,7	500,0	475,0	438,0	388,0
4	763,2	715,9	652,3	613,0	564,9	511,1	426,8
5	954,0	862,0	765,3	698,4	638,2	555,1	461,7
6	1 144,8	992,0	843,8	764,3	681,5	589,1	479,1
7	1 335,6	1 107,4	914,3	814,8	720,2	616,0	498,5
8	1 526,4	1 209,7	972,4	853,6	750,7	633,4	504,4
10	1 908	1 378,7	1 067	910,6	800,2	663,7	517,3
12	2 290	1 513,2	1 124,9	950,6	824,4		
16	3 053	1 697,8	1 207,8	1 007,0	860,8		
20	3 816	1 820,9	1 258,1	1 038,7			

4. Conclusion

Le remplacement des sources continues par des sources ponctuelles n'entraîne pas de variations importantes dans la répartition des doses à condition que l'espacement entre les sources soit inférieur à 2 cm.

Ce sont donc des considérations techniques et pratiques qui devront dicter au radiothérapeute le choix du nombre de sources à utiliser.

II. Choix du nombre de sources ponctuelles, de leur répartition et de leur activité

Le radiothérapeute qui désire utiliser des sources ponctuelles doit prévoir les dimensions du volume traité et calculer le temps d'application en fonction du nombre de sources utilisées et de leurs activités.

1. Dimensions du volume traité

Comme nous l'avons vu, le rayon du volume traité est par définition égal à 2 cm.

La longueur de ce volume l (en cm) peut être calculée à partir d'une formule empirique

$$l = (N - 1) E + \frac{E}{2} + 2 \quad (1)$$

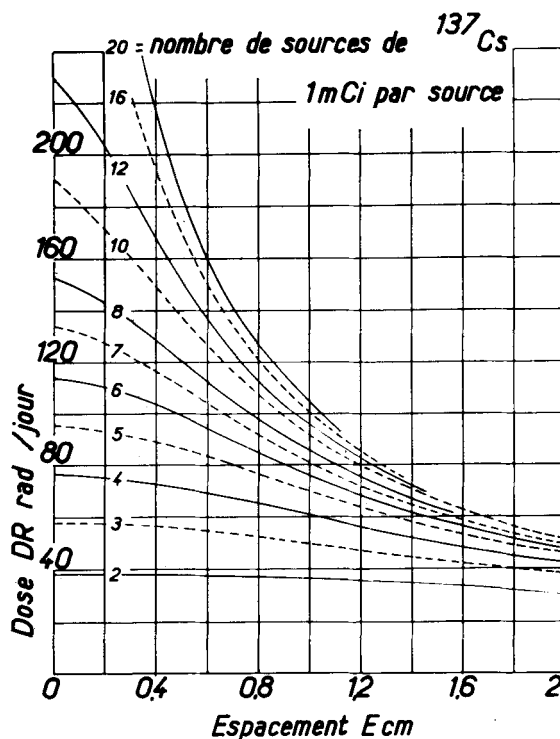


Fig. 3. Variation de la dose de référence DR au point T en fonction du nombre N de sources et de leur espacement.

où E est l'espacement entre 2 sources en cm; c'est-à-dire que la distance s entre une source extrême et l'isodose DR est égale à $1 \text{ cm} + E/4$. L'erreur faite sur cette distance en utilisant cette formule empirique est inférieure à 2 mm comme le montre le Tableau 1.

2. Calcul de la dose DR

La dose de référence DR délivrée à 2 cm de l'axe de la sonde dans un plan perpendiculaire en son centre est proportionnelle à l'activité des sources et au temps d'application; elle n'est pas une fonction simple du nombre de sources et de leur espacement. C'est pourquoi nous avons construit une abaque permettant d'évaluer DR en rad/jour pour des sources de 1 mCi (Fig. 3 et Tableau 2).

A partir de là, la dose totale DA délivrée au point de référence T au cours d'une application se calcule par la formule $DA = DR \cdot Q \cdot t$, où Q est l'activité de chaque source en mCi et t le temps d'application en jours.

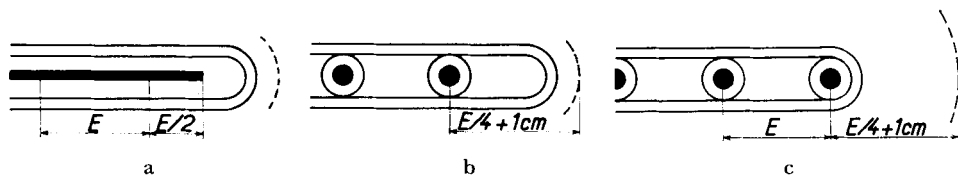


Fig. 4. Choix de la disposition des sources dans une sonde intra-utérine de longueur donnée. a) La partie active de la source continue de radium n'atteint pas l'extrémité de la sonde; la courbe pointillée représente l'extrémité de l'isodose DR. b) Une distribution des doses analogue est obtenue en plaçant les sources ponctuelles suivant le schéma défini fig. 1. c) La longueur du volume traité peut être augmentée en plaçant une source ponctuelle à l'extrémité de la sonde.

3. Choix du nombre de sources et de leur espacement

La longueur S de la sonde est déterminée par la configuration anatomique de la malade, mais le radiothérapeute a le choix du nombre de sources et de leur disposition.

A. S'il désire reproduire le plus exactement possible le schéma d'irradiation obtenu avec une source continue de radium de longueur active $2L$ et d'activité Q_{Ra} , le nombre N de sources ponctuelles de césium, leur espacement E et leurs activités individuelles Q_c sont liées par les relations:

$$N \cdot E = 2L \quad N \cdot \Gamma_c \cdot Q_c = \Gamma_{Ra} \cdot Q_{Ra}$$

$$\text{d'où} \quad Q_c = 2,5 \cdot Q_{Ra}/N$$

Γ_c et Γ_{Ra} sont les constantes spécifiques d'exposition du césium et du radium

$$\Gamma_c = 3,3 \text{ R} \cdot \text{cm}^2/\text{mCi} \cdot h$$

$$\Gamma_{Ra} = 8,25 \text{ R} \cdot \text{cm}^2/\text{mCi} \cdot h, \text{ pour une filtration de } 0,5 \text{ mm de Pt.}$$

Ainsi pour remplacer une source de radium de 30 mCi et de longueur active de 6 cm, on peut utiliser 6 sources espacées de 1 cm (Fig. 4), les sources ponctuelles extrêmes étant situées à 5 mm des extrémités de la zone active de la source continue. La longueur du volume traité est égale à $5 \times 1 + 2 + 0,5 = 7,5$ cm.

L'activité de chaque source de césium devrait être égale à $(2,5 \times 30)/6 = 12,5$ mCi pour que les temps d'application soient identiques et la dose DR à 2 cm serait égale à $6,5 \times 12,5 \text{ rad/jour} = 956 \text{ rad/jour}$.

B. Le radiothérapeute peut souhaiter profiter de la souplesse d'utilisation des sources ponctuelles pour irradier un volume un peu plus long.

Il peut dans ce cas placer une source ponctuelle à chaque extrémité de la sonde; si la longueur de la sonde est S cm et si l'on dispose N sources ponctuelles régulièrement espacées de E cm, on a $(N - 1) E = S$.

Ainsi pour une sonde de longueur 6,5 cm, on peut placer 6 sources espacées de 1,3 cm; la longueur du volume traité est égale à $5 \times 1,3 + 2 + 0,65 = 9,15$ cm au lieu de 7,5 cm précédemment. Si on utilise les mêmes sources de 12,5 mCi, la dose à 2 cm est $652 \times 12,5 = 815$ rad/jour.

III. Espacement non uniforme des sources ponctuelles

Compte tenu de la plus grande souplesse dont on dispose avec les sources ponctuelles, on serait tenté d'essayer d'améliorer la forme du volume traité et en particulier d'augmenter son rayon au niveau des extrémités de la sonde et d'allonger la distance entre l'extrémité de la sonde et la limite du volume traité.

Ceci peut se réaliser en concentrant aux extrémités de la sonde une proportion plus grande de radioactivité. L'utilisation de sources d'activités différentes nous paraît peu recommandable en raison du risque possible de confusion entre les sources. Par contre, on peut songer à réduire l'espacement (E_a) entre la dernière et l'avant dernière source, ce qui ne doit pas poser de problèmes pratiques majeurs.

Nous avons étudié de manière systématique l'influence sur la forme du volume traité de la réduction de E_a à une valeur égale à $1/2$, $1/3$ et $1/4$ de l'espacement moyen E . Compte tenu des dimensions des sources que l'on peut être amené à utiliser, il nous paraît difficile de réduire E_a à une valeur inférieure à $E/4$.

1. Le rayon du volume traité

Nous avons étudié les variations du rayon du volume traité à la distance $0,75 L$ du centre de la source et à l'extrémité de celle-ci.

A. Variation du rayon à $0,75 L$. Quand on réduit E_a de E à $E/4$ et pour $E = 2$ cm, le rayon du volume traité augmente de 2 mm. Il passe de 18 à 20 mm pour $N = 4$ et 5 et de 19 à 21 mm pour $N = 8$.

Pour $E = 1$ cm et dans les mêmes conditions, le rayon du volume traité augmente de 1 mm, il passe de 18 à 19 mm.

B. Variation du rayon à l'extrémité de la sonde. Quand on réduit E_a de E à $E/4$ et pour $E = 2$ cm, le rayon du volume traité augmente de 2 mm pour $N = 4$ et 5 (il passe de 17 à 19 mm) et augmente de 4 mm pour $N = 6$ à 8 (il passe de 16 à 20 mm).

Pour $E = 1$ cm et dans les mêmes conditions, le rayon augmente de 2 mm.

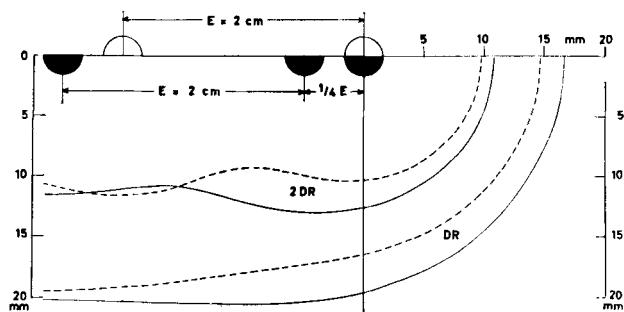


Fig. 5. Influence sur le forme des isodoses, de l'espacement entre les deux sources extrêmes. Deux dispositions des sources sont comparées, un espacement régulier (demi-cercles blancs et isodoses en pointillé) et un espacement réduit entre les deux sources extrêmes (demi-cercles noirs et isodoses en trait continu). On a fait coïncider les axes des sondes et les sources extrêmes. La réduction de l'espacement entre les sources extrêmes a pour effet d'augmenter le rayon du volume traité au niveau de l'extrémité de la sonde ainsi que la distance s entre la source extrême et l'isodose DR .

2. Longueur du volume traité

Nous avons étudié les variations de la distance s entre la source la plus externe et la limite du volume traité (plus précisément le point d'intersection entre l'axe de la sonde et l'isodose DR).

Pour $E = 2$ cm et quand E_d passe de E à $E/4$, s augmente de 1 mm pour $N = 4$ et 5 (s passe de 15 à 16 mm) et augmente de 3 mm pour $N = 7$ et 8 (s passe de 14 à 17 mm).

Pour $E = 1$ cm et dans les mêmes conditions, s augmente de 2 mm pour $N = 4$ à 8.

Conclusion

L'adoption d'un espacement non uniforme des sources ponctuelles et en particulier une réduction de E_d , ne modifie pas de manière importante la forme du volume traité dans les limites des dispositions envisagées. Le rayon du volume traité au niveau de l'extrémité de la sonde et la distance s peuvent être augmentées de quelques millimètres (Fig. 5).

Toutefois lorsqu'on adopte un espacement non uniforme des sources, le calcul de la dose de référence au point T ne peut pas être effectué à partir de Fig. 3 ou du Tableau 2; il est indispensable de faire le calcul précis correspondant à chaque cas particulier.

RÉSUMÉ

Pour les applications gynécologiques (sondes intrautérines) le remplacement des sources continues par des sources ponctuelles ne modifie pas de manière importante la distribution des doses à condition d'adopter entre les sources un espacement qui ne soit pas supérieur à 2 cm. Ceci concerne tant la forme et les dimensions du volume traité que celles des volumes surdosés. Des tableaux et des graphiques sont proposés permettant le calcul rapide de la dose de référence et des dimensions du volume traité pour des sources ponctuelles régulièrement espacées. La diminution de l'espacement entre les sources extrêmes ne modifie pas de manière importante la forme du volume traité, mais nécessite un calcul particulier des doses.

SUMMARY

The dose distribution in gynecologic treatments (intrauterine applicators) will not be much influenced by the substitution of point sources for continuous sources on condition that the distance between the sources is kept below 2 cm. This applies for the shape and dimensions of the treatment volume as well as of volumes receiving overdoses. Tables and diagrams are presented for a rapid determination of the reference dose and the dimensions of the treatment volume when using point sources regularly interspaced. A reduction of the distance between the extreme sources leads to no important modification of the treatment volume but necessitates a separate dose calculation.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Dosisverteilung bei gynäkologischer Radiotherapie (intrauterine Sonde) wird bei der Substitution kontinuierlicher Strahlungsquellen gegen Punktquellen nicht viel beeinflusst, wenn man die Abstände zwischen den Strahlungsquellen unter 2 cm hält. Dies ist sowohl für die Form und die Dimensionen des behandelten Volumens wie für das 'überdosierte' Volumen geltend. Tabelle und Diagramme werden für die schnelle Berechnung der Referenzdosis und die Dimensionen des Behandlungsvolumens bei Anwendung von Punktquellen die in gleichen Abständen placiert sind, vorgeschlagen. Bei einer Reduktion des Abstandes zwischen den extremen Quellen wird das Behandlungsvolumen nicht viel beeinflusst, aber eine besondere Dosisberechnung ist erforderlich.

BIBLIOGRAPHIE

- CARDIS R.: Sources de ^{137}Cs sphériques et de volume réduit, d'activité nominale unique, pour la curiethérapie gynécologique. *Ann. Radiol.* 11 (1968), 93.
C. E. A.: Catalogue des Radioéléments artificiels, p. 15. C. E. A., Gif-sur-Yvette, France 1966.
DUTREIX A.: Utilisation d'un ordinateur pour la dosimétrie en curiethérapie. *Ann. Phys. Biol. et Med.* 2 (1967), 139.