

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 90 (1964)
Heft: 5

Artikel: Calcul des écrans de protection contre les rayons X
Autor: Binggeli, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-66974>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève

Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne

Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève

Membres:

Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.

Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Grosqurin, arch.; J.-C. Ott, ing.

Neuchâtel: J. Béguin, arch.; R. Guye, ing.

Valais: G. de Kalbermann, ing.; D. Burgener, arch.

Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.

M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »

Président: D. Bonnard, ing.

Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; J. Favre,

arch.; A. Robert, ing.; J.-P. Stucky, ing.

Adresse: Avenue de la Gare 10, Lausanne

SOMMAIRE

Calcul des écrans de protection contre les rayons X, par E. Binggeli, ingénieur chez Bonnard & Gardel, ingénieurs-conseil.
Construction d'un bâtiment pour l'installation d'un bétatron et des services connexes, par Marcel Maillard, architecte SIA,
Installation d'un laboratoire pour la manipulation de substances radio-actives, par A. Lerch, G. Lerch, P. Lerch et J.-J. Gostely.
Société vaudoise des ingénieurs et des architectes : Rapport d'activité 1963.
Bibliographie. — Divers. — Les congrès. — Carnet des concours.
Documentation générale. — Nouveautés, informations diverses.

CALCUL DES ÉCRANS DE PROTECTION CONTRE LES RAYONS X

par E. BINGGELI, ingénieur chez BONNARD & GARDEL, ingénieurs-conseil à Lausanne

I. Introduction

Les rayons X utilisés en médecine, pour le diagnostic et la thérapie, constituent un auxiliaire précieux pour les médecins. Cependant ceux-ci et le personnel qui travaille au voisinage des appareils à rayons X courraient des risques graves pour leur santé s'ils étaient soumis régulièrement à l'action de ces rayons.

C'est la raison pour laquelle les appareils de production des rayons X doivent être installés dans des locaux spécialement aménagés, munis de parois capables d'absorber les rayons X, de telle sorte que l'irradiation dans les locaux contigus soit suffisamment faible.

La commande des appareils puissants (radiothérapie) s'effectue d'ailleurs à distance, sous la protection d'écrans de verre spécial.

Le mode de calcul des écrans de protection est illustré par les deux exemples suivants.

¹ La Source, Lausanne; Pierre Bonnard, architecte.

² Philips Roentgen S.A.

RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,

architecte

Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »

Tirés à part, renseignements

Avenue de Cour 27, Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse Fr. 34.—	Etranger Fr. 38.—
Sociétaires	» 28.—	» 34.—
Prix du numéro	» 1.60	

Chèques postaux : « Bulletin technique de la Suisse romande »,
N° II 57 75, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à : Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:

1/1 page	Fr. 350.—
1/2 "	» 180.—
1/4 "	» 93.—
1/8 "	» 47.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.

Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26. Lausanne et succursales



II. Calcul des écrans de protection contre les rayons X pour la salle de radiothérapie profonde d'une clinique¹

1. Description de l'installation

La salle de radiothérapie étudiée est représentée dans la figure 1. Elle est équipée d'un appareil à rayons X du type Müller RT 250², dont la position est reportée sur la figure.

Les déplacements possibles de l'ampoule à rayons X sont tels que le foyer peut occuper n'importe quel point à l'intérieur d'un prisme de section droite RSTU, limité par les plans horizontaux de cote 52 cm et 490 cm, par rapport à la surface du sol; pour chaque position du foyer, l'axe du faisceau peut être orienté dans toutes les directions, à l'exception d'un cône d'inaccessibilité ayant un angle d'ouverture de 120°, dirigé vers le support de l'appareil; l'ouverture du faisceau, limité par le localisateur, atteint au maximum 27°.

Les positions extrêmes de l'axe et des bords du

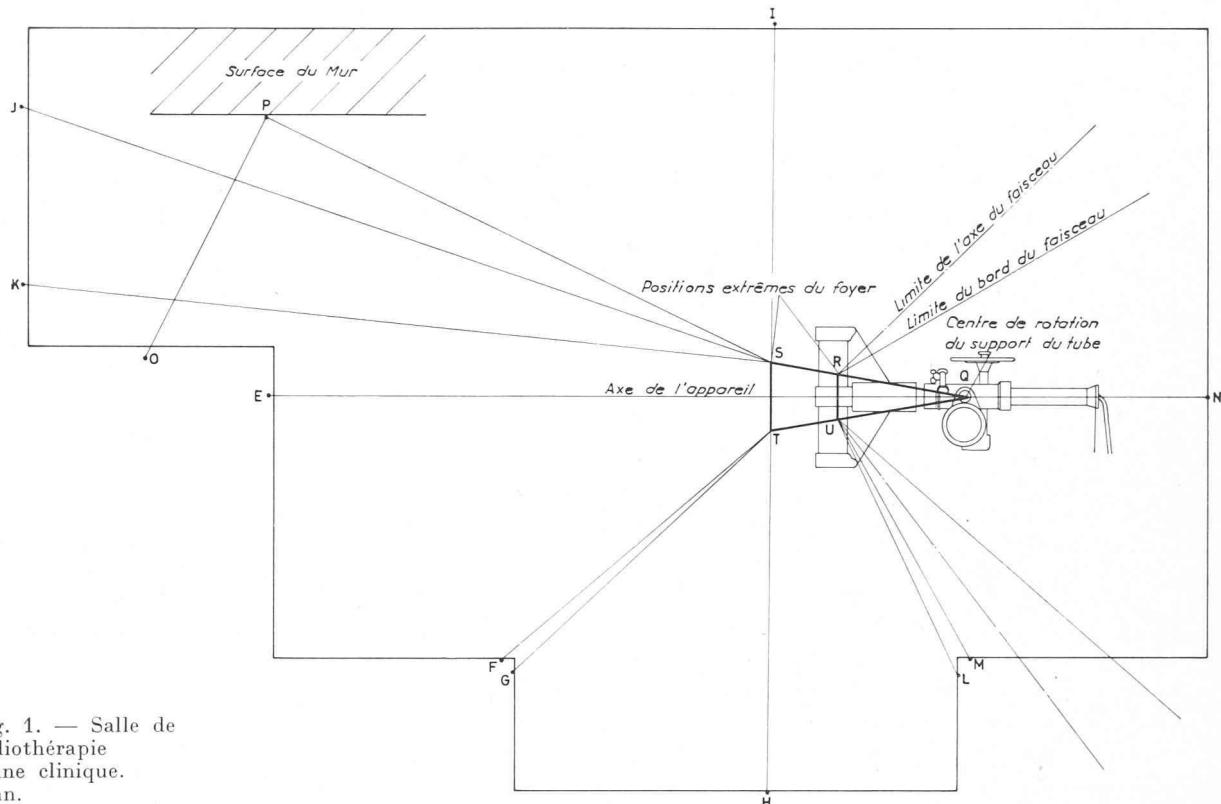


Fig. 1. — Salle de radiothérapie d'une clinique.
Plan.

faisceau, dans le plan horizontal passant par le foyer, sont indiquées sur la figure.

La salle de radiothérapie est séparée des locaux contigus par des murs de béton et de briques barytées, les portes étant revêtues de feuilles de plomb.

Aucun local n'existe au-dessous du plancher et au-dessus du plafond ; les locaux contigus ne peuvent être occupés que par des personnes professionnellement exposées aux radiations (médecins, assistants) ainsi que par des patients.

Après avoir établi un plan de la salle de radiothérapie sur lequel la nature et les dimensions des écrans sont indiquées (sur la base des indications du fournisseur), l'architecte demande au bureau d'ingénieurs-conseil de calculer l'efficacité des écrans proposés et de prendre la responsabilité de la protection du personnel contre les rayons X.

Le calcul s'effectue à partir des données précisées ci-après.

2. Tension d'alimentation

Le premier élément à connaître est la tension d'alimentation du tube à rayons X, car le rayonnement X est d'autant plus pénétrant que la tension d'alimentation est plus élevée.

L'ampoule à rayons X considérée fonctionne sous une tension continue de 250 kV.

3. Facteur de charge

Le facteur de charge est le produit de l'intensité moyenne du courant traversant l'ampoule à rayons X par la durée moyenne de fonctionnement effectif du tube, durant une semaine ; il s'exprime couramment en milliampères-minutes par semaine (mA.min/sem).

L'intensité du rayonnement produit par le tube à rayons X est proportionnelle au facteur de charge ;

celui-ci est déterminé en collaboration avec le médecin radiologue. Dans notre cas, ce facteur a été admis de 13 500 mA.min/sem correspondant à une utilisation hebdomadaire de quinze heures, l'intensité du courant étant de 15 mA.

4. Facteur d'utilisation et facteur d'occupation

Le facteur d'utilisation est le rapport entre la durée moyenne d'utilisation de l'appareil à rayons X dans une position déterminée (par exemple au voisinage d'une paroi), et la durée totale d'utilisation de cet appareil. Ce facteur a été pris égal à 1, en première approximation, ce qui revient à dire que les écrans sont dimensionnés pour les positions défavorables de l'appareil et non pour une position moyenne qui, dans l'état de nos connaissances, ne peut être choisie qu'arbitrairement.

Cette hypothèse introduit un petit facteur de sécurité dans le calcul des écrans de protection.

Le facteur d'occupation est le rapport entre la durée moyenne d'occupation des locaux contigus aux salles à rayons X (où le personnel et les patients attendant d'être traités sont protégés par des écrans) et la durée totale de l'utilisation des appareils à rayons X. Ce facteur a également été pris égal à 1, en première approximation, ce qui revient à dire que l'on admet que ces locaux sont toujours occupés durant le fonctionnement des appareils, ce qui sera vraisemblablement le cas.

5. Dose maximale admissible

Les locaux voisins de la salle de radiothérapie ne pouvant être occupés que par des personnes professionnellement exposées aux radiations, la dose maximale admissible à considérer est de 100 mrem/semaine, conformément aux dernières recommandations de l'ICRP (1959).

6. Irradiations considérées

On admet tout d'abord que l'appareil est utilisé normalement, suivant les règles de l'art ; c'est-à-dire que l'on ne considère pas les irradiations qui ne pourraient résulter que d'une manipulation fantaisiste de l'appareil, incompatibles avec le traitement d'un patient.

Les écrans de protection sont calculés en tenant compte des possibilités normales d'irradiation directe, du rayonnement diffusé émis par les corps irradiés et du rayonnement de fuite traversant l'enveloppe de protection des ampoules à rayons X.

7. Distances considérées

L'épaisseur des écrans est calculée pour toutes les distances possibles entre la source et certains points de référence où l'on considère que la dose d'irradiation prévue est délivrée.

Ces points de référence sont choisis au contact de l'extérieur des écrans, c'est-à-dire au contact des parois intérieures des locaux contigus à la salle de radiothérapie, de telle sorte que les distances soient minimales (points les plus exposés) ; la protection étant suffisante pour ces points sera à fortiori suffisante pour tout autre point situé derrière le même écran. Les points considérés pour l'irradiation directe sont les points : *E, F, G, H, I, J, K, L, M* de la figure 1 ; le rayonnement diffusé par le patient a été calculé aux points *M* et *N* et celui diffusé au point *P* est calculé au point *O* ; l'effet du rayonnement de fuite est calculé au point *N*.

8. Facteur d'obliquité

Lorsque le rayonnement incident atteint obliquement une paroi, on tient compte de l'épaisseur réelle de matière traversée, supérieure à l'épaisseur normale de la paroi, en introduisant le facteur de correction d'obliquité :

$$r = x/\cos \alpha \quad (1)$$

r: épaisseur traversée ;

x: épaisseur normale ;

α : angle d'incidence du rayonnement.

9. Calcul des écrans de protection contre le rayonnement direct

Le calcul de l'absorption d'un rayonnement gamma monochromatique par un écran est relativement simple ; plus exactement, on dispose de méthodes de calcul approximatives relativement simples qui permettent de déterminer l'intensité relative du rayonnement transmis par l'écran.

Dans le cas d'une source ponctuelle, pour un écran mince et homogène et un faisceau gamma collimaté (conditions qui permettent d'admettre que tout photon ayant subi une interaction avec la matière de l'écran est éliminé du faisceau), la loi d'absorption est la suivante :

$$I = \frac{I_0 e^{-u}}{4\pi R^2} \quad (2)$$

I: intensité transmise ;

I₀: intensité initiale ;

R: distance de la source à l'écran ;

u: épaisseur de l'écran, exprimée en nombre de longueurs de relaxation.

Soit :

$$u = x/\lambda \quad (3)$$

la longueur de relaxation λ étant l'épaisseur de l'écran considéré qui atténue le rayonnement d'un facteur *e* (base des logarithmes népériens), dans les conditions précisées ci-dessus, et *x* l'épaisseur de l'écran.

Lorsque l'écran est épais et homogène et le faisceau large, la formule (2) se complique d'un facteur de correction *B*, appelé « build-up factor », qui dépend notamment de l'énergie initiale des photons, de la nature de l'écran et de son épaisseur.

Pour les sources non ponctuelles et pour les écrans hétérogènes, le calcul est encore plus compliqué, mais reste possible par une voie théorique. Il n'est par contre plus possible de calculer d'une façon simple l'absorption des rayons X par les écrans, à l'aide d'une formule, parce que le rayonnement X présente un spectre complexe, dû à la superposition d'un spectre continu limité du côté des hautes fréquences en fonction de la tension d'alimentation du tube et d'un spectre de raies caractéristique de la nature des atomes de l'anode.

C'est la raison pour laquelle le calcul de l'absorption des rayons X s'appuie largement sur des données expérimentales, rassemblées sous forme de normes, par exemple les normes américaines publiées dans le « National Bureau of Standard Handbook 60 », ou les normes allemandes DIN 6812.

Ces normes donnent pour le plomb par exemple, pour quelques distances, quelques facteurs de charge et quelques tensions d'alimentation du tube, les épaisseurs nécessaires pour atténuer le rayonnement X de telle sorte que la dose absorbée soit de 300 mrem/semaine.

Le calcul suit alors le schéma suivant :

- a) On choisit dans les normes la tension la plus voisine de la tension d'alimentation du tube et on calcule les corrections à apporter aux épaisseurs indiquées par les normes du fait de la différence de tension ; ces corrections sont fonction de l'épaisseur et de la nature de l'écran, de la distance et des tensions considérées.
- b) On choisit une valeur *W_o* du facteur de charge indiquée par les normes, voisine du facteur de charge effectif *W*, et on calcule la correction ϵ_1 à apporter à la valeur *x_o* de l'épaisseur donnée par les normes pour une distance *d_o*, de la manière suivante :

Par exemple, pour $W_o = 10\ 000 \text{ mA} \cdot \text{min/sem}$ et $W = 13\ 500 \text{ mA} \cdot \text{min/sem}$

$$\frac{W}{W_o} = 1,35 = e^{0,30} \quad (4)$$

$$\text{d'où} \quad \epsilon_1 = 0,30 \cdot \lambda_o \quad (5)$$

λ_o étant la longueur de relaxation moyenne des rayons X pour la tension d'alimentation et l'épaisseur considérée.

L'épaisseur ϵ_1 doit être ajoutée à l'épaisseur *x_o* indiquée par les normes.

- c) Les normes sont établies pour une tension d'alimentation redressée, non continue, caractérisée par une tension de pointe. Pour les appareils modernes à rayons X, alimentés par une tension continue égale à cette tension de pointe, l'intensité du rayonnement X plus grande conduit à majorer l'épaisseur donnée par les normes d'une épaisseur ϵ_2 donnée par :

$$\epsilon_2 = \frac{1}{4} (x_o + \epsilon_1) \quad (6)$$

- d) Les normes étant établies pour une dose de rayonnement de 300 mrem/semaine, il faut calculer une nouvelle correction pour tenir compte de la dose de rayonnement admissible dans le cas considéré. Cette correction conduit à majorer l'épaisseur donnée par les normes d'une épaisseur ϵ_3 .

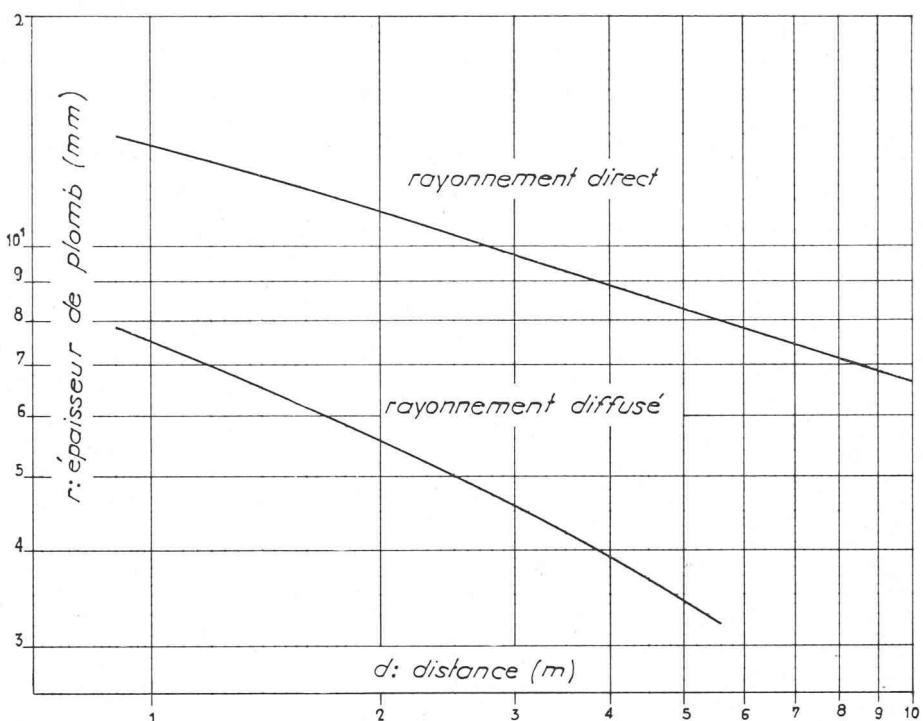


Fig. 2. — Courbes r_i en fonction de d_i .

Dans notre cas, la dose maximale admissible étant de 100 mrem/sem, on a :

$$\frac{300}{100} = e^{1.10}$$

$$\text{et } \epsilon_3 = 1.10 \cdot \lambda_0 \quad (7)$$

e) L'épaisseur définitive correspondant à la distance d_0 sera donc donnée par :

$$r = x_0 + \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (8)$$

f) Ces calculs étant répétés pour diverses valeurs x_i correspondant à différentes distances d_i , il sera possible de construire la courbe r_i en fonction de d_i . La courbe correspondant à notre exemple est donnée dans la figure 2, pour le plomb.

g) A l'aide des courbes ainsi construites, on détermine immédiatement les épaisseurs nécessaires pour les divers écrans, compte tenu de (1) et des distances considérées.

Si l'écran est constitué d'une autre matière que le plomb, on applique des relations d'équivalence entre les épaisseurs de ces matériaux et les épaisseurs de plomb ; un exemple de ces relations (déterminées expérimentalement) est donné dans le tableau suivant.

Épaisseurs équivalentes de briques barytées et de plomb

Briques barytées		Épaisseurs équivalentes de plomb		
Densité	Epaisseur	Rayons X de 200 kV	Rayons X de 300 kV	Rayons Y de Co-60
1,8	120 mm	2,7 mm	3,9 mm	—
2,4	120 mm	—	6,8 mm	—
3,2	120 mm	—	11,2 mm	30 mm
3,8	115 mm	—	—	35 mm

10. Calcul des écrans de protection contre le rayonnement diffusé

Le rayonnement diffusé par les matériaux soumis au rayonnement direct est plus faible que celui-ci ; il peut par contre atteindre des zones qui sont à l'abri du rayonnement direct.

Les normes donnent pour le rayonnement diffusé à

90° les mêmes indications que pour le rayonnement direct et le calcul doit être conduit exactement de la même manière. La figure 2 donne la courbe de r_i en fonction de d_i pour le rayonnement diffusé, dans le cas considéré. La principale source de rayonnement diffusé est le patient et la table qui le supporte éventuellement. Cependant, le rayonnement diffusé peut également prendre naissance dans les parois de la salle.

C'est notamment le cas au point P (fig. 1). Le calcul du rayonnement diffusé issu de P a été fait en supposant que le rayonnement incident avait traversé le patient sans atténuation (même énergie que le rayonnement direct), mais que son intensité était réduite en fonction de la distance ; les normes américaines étant établies en supposant que la distance de la source des rayons X au patient est de l'ordre de 50 cm, cette distance a été admise au lieu de $SP = 325$ cm.

Le facteur de réduction correspondant $(50/325)^2$ appliqué au facteur de charge W donne un facteur de charge fictif $W' = 320 \text{ mA} \cdot \text{min}/\text{semaine}$, qui permet le calcul du rayonnement diffusé à 90° au point O .

11. Calcul des écrans de protection contre le rayonnement de fuite

Les tubes à rayons X sont blindés de tous les côtés, de telle sorte que le rayonnement de fuite soit limité à :

0,1 rem/h à 1 mètre, pour les tubes de diagnostic;
1 rem/h à 1 mètre, pour les tubes de thérapie.

Les normes indiquent, pour le plomb par exemple, les longueurs de relaxation qui correspondent aux tensions d'alimentation de ces deux types de tube, ainsi que le nombre de longueurs de relaxation qui sont nécessaires pour limiter les doses d'exposition à 300 mrem/semaine, en fonction de la distance et de la durée moyenne de fonctionnement du tube.

A partir de ces données, on calcule les écrans nécessaires par une voie analogue à celle utilisée pour le rayonnement direct.

12. Résultats des calculs

Les calculs ont montré que les écrans de la salle de radiothérapie devaient avoir les épaisseurs équivalentes de plomb suivantes :

	Points	Épaisseurs équivalentes de plomb mm
Rayonnement direct	E	9,8
	F	7,0
	G	7,8
	H	10,8
	I	11,1
	J	8,1
	K	8,4
	L	4,9
Rayonnement diffusé	M	10,5
	M	5,5
	N	5,4
Rayonnement de fuite	O	2,2
	N	4,8

Ces écrans ont été réalisés soit en plomb, soit à l'aide de briques barytées, soit encore en béton.

III. Calcul des écrans de protection pour un institut de radiologie¹ situé dans une maison locative

1. Description de l'installation

Cet institut est équipé de plusieurs appareils à rayons X, et notamment d'un appareil de radiothérapie profonde ayant les mêmes caractéristiques que celui de la clinique (cf. II) ; cet appareil ayant la tension d'alimentation la plus élevée (250 kV) conditionne les écrans de protection.

L'institut se trouve au premier étage d'une maison locative ; au-dessous, au rez-de-chaussée, il y a des magasins et, au-dessus, le deuxième étage est constitué par des appartements.

2. Doses maximales admissibles

Les personnes vivant au-dessous et au-dessus de l'institut n'étant pas des personnes professionnellement exposées aux radiations, la dose maximale admissible de 100 mrem/semaine doit être réduite d'un facteur 10, conformément aux recommandations de l'ICRP.

Pour les locaux de l'institut contigus aux salles d'irradiation, par contre, la dose de 100 mrem/semaine est applicable.

3. Distances considérées

Pour la protection des habitants du deuxième étage, les points de référence sont choisis au niveau du plancher, 30 cm au-dessus de l'écran du plafond de l'institut ; pour la protection des habitants du rez-de-chaussée, les points de référence sont choisis 180 cm au-dessus du sol de cet étage.

4. Calcul des écrans de protection contre les rayonnements X

Ce calcul est conduit comme dans l'exemple précédent. Signalons cependant que l'épaisseur équivalente en plomb nécessaire pour le plancher, sous l'appareil à 250 kV, atteint 13 mm de plomb. L'épaisseur du blindage à prévoir pour le plafond soumis au rayonnement diffusé (à 90°) par le patient atteint 7 mm de plomb.

Cette épaisseur considérable pose des problèmes constructifs difficiles à résoudre ; de plus, elle entraîne des frais importants.

C'est la raison pour laquelle, dans ce cas particulier, nous avons calculé l'écran du plafond en tenant compte des angles de diffusion différents de 90°.

5. Calcul de l'écran du plafond

La diffusion du rayonnement X est principalement due à l'effet Compton.

Rappelons que cet effet correspond à l'interaction (collision) entre un photon d'énergie initiale E_o et un électron, accompagnée d'une nouvelle répartition des énergies et des quantités de mouvement, la fréquence (l'énergie) du photon diffusé ne pouvant être qu'inférieure à la fréquence initiale.

L'énergie E des photons diffusés est d'autant plus faible que l'angle de diffusion est plus grand, suivant la relation :

$$E = \frac{0,51}{1 - \cos \theta + \frac{0,51}{E_o}} \text{ MeV} \quad (9)$$

θ : angle de diffusion ;
0,51 MeV étant l'énergie équivalente à la masse au repos de l'électron.

La méthode de calcul consiste à remplacer le spectre complexe d'énergie des rayons X par une énergie moyenne équivalente \bar{E} , puis à calculer pour diverses valeurs de l'angle θ les valeurs de l'énergie diffusée et les longueurs de relaxation correspondantes (inférieures à celle relative aux photons diffusés à angle droit).

Le nombre de longueurs de relaxation nécessaires pour atténuer le rayonnement diffusé à 90° étant connu, les nouvelles épaisseurs de l'écran sont déterminées.

C'est ainsi que l'application de cette méthode a permis de réduire l'épaisseur de l'écran de plomb du plafond à 3 mm aux courtes distances et à 2,5 mm aux distances plus élevées.

IV. Conclusions

Ces exemples ont montré que le calcul des écrans de protection contre les rayons X présente certaines difficultés. Bien qu'il existe des normes, chaque cas doit être considéré comme particulier ; il est parfois nécessaire d'utiliser les méthodes de calcul appliquées couramment pour déterminer les blindages des installations nucléaires.

Le calcul des écrans de protection contre les rayons X des appareils de diagnostic est en principe plus simple que pour les appareils de thérapie, les tensions d'alimentation des tubes étant inférieures ; il convient de relever cependant que les indications données par les fournisseurs des appareils, sur les épaisseurs des écrans nécessaires, n'engagent pas leur responsabilité.

La collaboration de l'architecte et de l'ingénieur dans la recherche des dispositions constructives et l'exécution des travaux (fixation des écrans, traversées des conduites et des canaux de ventilation, portes, etc. n'altérant pas l'intégrité de la protection) favorise la réalisation d'installations qui assurent une protection efficace des personnes dans l'intérêt de la santé publique.

¹ Institut de radiologie du Dr M. Bugnion.