

Blindage contre les grands champs de rayons X primaires et diffusés des appareils triphasés au moyen de panneaux de verre, de gypse et de plomb acoustique

J.-M. LÉGARÉ, P.-E. CARRIÈRES, A. MANSEAU (*)
C. BIBEAU, J. ROBERT, N. ROBIDOUX (**)

(Manuscrit reçu le 5 mai 1977)

RÉSUMÉ

Les auteurs ont évalué expérimentalement les propriétés de blindage de certains matériaux exposés à de grands champs de rayons X primaires provenant d'appareils à rayons X triphasés fonctionnant entre 40 et 150 kV ainsi qu'aux rayons X diffusés perpendiculairement. Ce travail donne les pourcentages de transmission des rayons X à travers des matériaux composés d'un nombre variable de panneaux constitués soit de verre de 19 mm d'épaisseur, soit de gypse de 9,5 et de 16 mm d'épaisseur, soit de feuilles de 0,8 et 1,6 mm de plomb acoustique. On y trouve également les épaisseurs équivalentes correspondantes en plomb laminé et en béton. Selon l'épaisseur totale des panneaux de verre, le verre peut convenir très bien comme matériau de blindage aux tensions inférieures, notamment en mammographie, mais il est très mauvais pour le blindage des salles de rayons X utilisant des techniques de haute tension. Les panneaux de gypse peuvent, selon l'épaisseur totale, assurer une certaine protection, surtout aux voltages inférieurs, pourvu qu'on se soit assuré de l'élimination des fuites dues aux perforations et aux joints. Quant au plomb acoustique, les mesures confirment qu'il est un matériau tout à fait inacceptable en raison des variations importantes de l'épaisseur, ce qui n'est pas le cas pour le plomb laminé.

SUMMARY

The shielding properties of materials exposed both to broad primary X-ray beams coming from triphase X-ray equipment working between 40 and 150 kV and to broad beams scattered at 90° were evaluated experimentally.

(*) Services de protection de l'environnement, Gouvernement du Québec, 9310, boulevard Saint-Laurent, Montréal, Québec.

(**) Centre de Réadaptation du Québec, 2275 est, rue Laurier, Montréal, Québec.

The percentages of X-ray transmission through various numbers of panels made of 19 mm thick glass, 9.5 and 16 mm thick gypsum or 0.8 and 1.6 mm thick acoustical lead are given. The concrete and laminated lead equivalents are also given. According to the total thickness of glass, this material can be an adequate material for shielding purposes at relatively low voltages—as in mammography—but is found to be a bad shielding material for X-ray rooms where high voltage technics are used. Depending on their total thickness, gypsum sheets can give some protection especially at lower voltages, provided care is taken so as to avoid leaks due to perforations and joints. As to acoustical lead, measurements confirmed that it is totally inadequate as shielding material owing to large fluctuations in thickness, which is not the case for laminated lead.

INTRODUCTION

En entreprenant ce travail avec l'assistance technique du Centre de Réadaptation du Québec, la section de radioprotection des Services de protection de l'environnement du Québec (S.P.E.Q.) visait d'abord à obtenir des données adéquates et des conclusions pertinentes lui permettant d'évaluer d'une façon plus réaliste notamment l'efficacité et la contribution de certains matériaux modernes (verres, gypse, etc.) dans le blindage des nouvelles constructions d'installations de rayons X. Au Québec, d'après la loi de la qualité de l'environnement [1], il est nécessaire de faire approuver par les S.P.E.Q. les plans et les devis de telles installations nouvelles et d'obtenir des S.P.E.Q. un certificat d'autorisation avant de construire et d'utiliser l'installation.

Tous nos calculs des épaisseurs de blindage requises s'appuient entre autres sur les équivalents de dose maximaux admissibles de 5 rem/an et sur les équivalents de doses limites de 0,5 rem/an. En supposant environ 50 semaines d'exposition par année, ceci conduit à des expositions maximales de 100 mR/semaine pour les travailleurs affectés à des travaux sous rayonnements ionisants et à 10 mR/semaine pour un nombre limité de personnes du public. Notons que nous utilisons un facteur de sécurité de 4 afin de suivre la tendance internationale de diminuer les limites supérieures et afin d'éviter de refaire l'installation si la charge de travail, le facteur d'occupation ou le facteur d'utilisation venait à changer.

En radiologie médicale, en radiobiologie ainsi qu'en radiographie industrielle, les matériaux de blindage les plus utilisés pour la protection contre les rayonnement ionisants sont, selon les cas et les circonstances, le plomb, le béton, le verre plombé, l'acier et le sable emmuré.

Certains autres matériaux sont utilisés parfois soit comme barrières protectrices contre les rayons X, soit comme matériaux de finition. Outre le plomb, les matériaux les plus connus quantitativement au point de vue du blindage sont le béton, le fer, le béton au baryum, la brique et le mâchefer [6]. Nous ne connaissons pas ou peu le pouvoir d'atténuation des autres matériaux pour la protection contre les rayons X. C'est notamment le cas pour les panneaux de verre ordinaire, de gypse et de plomb acoustique.

TABLEAU I
TRANSMISSION DES GRANDS CHAMPS DE RAYONS X PRIMAIRES ET DIFFUSÉS AU TRAVERS DU VERRE ORDINAIRE

Tension (KV)	Auteurs (*) LÉGARÉ (L) O'RRIORDAN (O) TROUT (T)		Épaisseurs de verre (cm) pour des transmissions de 0,5 à 10 ⁻⁵											
	0,5		10 ⁻¹		10 ⁻²		10 ⁻³		10 ⁻⁴		10 ⁻⁵			
	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)		
15.....	—	—	0,03	—	0,08	—	0,19	—	0,30	—	0,40			
20.....	—	—	0,04	—	0,17	—	0,32	—	0,53	—	0,80			
30.....	—	—	0,05	—	0,28	—	0,75	—	1,43	—	2,18			
40.....	0,27	0,27	1,16	1,05	2,80	2,35	4,47	—	6,25	—	—			
50.....	—	—	0,07	—	0,43	—	1,38	—	2,70	—	4,12			
60.....	—	—	0,10	—	0,62	—	2,15	—	4,15	—	—			
70.....	0,10	—	0,43	—	1,35	—	2,8	—	—	—	—			
80.....	0,45	0,32	1,51	1,48	4,24	3,42	7,00	5,60	—	—	—			
100.....	0,17	—	1,13	—	3,55	—	6,9	—	—	—	—			
125.....	0,58	0,52	2,30	2,28	5,85	5,38	—	9,1	—	—	—			
150.....	0,73	0,59	3,19	2,55	8,40	6,40	—	12	—	—	—			
	0,50	—	2,97	—	7,57	—	—	—	—	—	—			
	0,90	0,87	4,10	3,28	—	7,9	—	13,6	—	—	—			
	0,63	—	3,85	—	—	—	—	—	—	—	—			
	1,13	—	4,82	—	—	—	—	—	—	—	—			
	0,73	—	4,5	—	—	—	—	—	—	—	—			

(*) LÉGARÉ, triphasé, 12 impulsions, filtration totale de 2,5 mm Al; O'RRIORDAN, triphasé, 6 impulsions, fenêtre de 1 mm Be; TROUT, monophasé, filtration de 0,5 à 2,5 mm Al.

(*) primaires; (*) diffusés.

Le rapport n° 34 du N.C.R.P. [3] dit que compte tenu des corrections de densité, le verre est comparable au béton, mais aucune donnée expérimentale n'appuie cette affirmation. Dans le cas du blindage avec du verre, O'RIORDAN *et al.* ainsi que TROUT *et al.* [4-5] ont publié certaines données utilisables pour les rayons X provenant d'appareils monophasés ou triphasés à certaines hautes tensions. Ces quelques résultats fragmentaires pour le verre s'ajoutent à ceux de notre travail (tableau I).

Quant aux panneaux de gypse, il existe au Québec de tels panneaux sous le nom commercial de Gyproc. Ceux-ci comprennent deux cartons entre lesquels se trouvent diverses épaisseurs de gypse.

Aucune donnée n'existe dans la littérature scientifique sur le blindage au plomb acoustique. Notons que le plomb acoustique utilisé principalement à des fins d'insonorisation est fabriqué à partir de plomb chaud liquide coulé sur un rouleau froid sur lequel il fige. La vitesse du rouleau détermine l'épaisseur du plomb acoustique. Dans le but de connaître sa valeur pour la protection contre les rayons X provenant des appareils à rayons X triphasés, nous avons comparé le plomb acoustique au plomb conventionnel laminé tel qu'obtenu par compression de plomb à l'état solide entre des rouleaux.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Comme source de rayonnements, nous avons utilisé un appareil de radiographie médicale du Centre de Réadaptation du Québec. Ce générateur de rayons X est un appareil triphasé à douze impulsions redressées par cycle. La filtration totale est de 2,5 mm d'aluminium (1,5+1,0 mm ajouté). Nous avons effectué les mesures de doses au moyen d'un dosimètre Pitman, modèle 37 C. La petite chambre en long de 3,5 cm³ a servi à mesurer les deux premières couches de demi-atténuation (CDA), la chambre de 35 cm³ à mesurer la transmission des grands champs primaires et la chambre de 350 cm³ à mesurer les rayons X diffusés.

Ces chambres possèdent des réponses énergétiques très acceptables tant pour la qualité des rayons X primaires que pour celle des rayons X diffusés dont la distribution énergétique est peu différente selon WAGGENER *et al.* [7]. L'excellence de la réponse angulaire telle que fournie par le fabricant illustre que ces chambres sont adéquates pour les rayons X diffusés qui lui arrivent à divers angles, contrairement aux rayons X primaires. Avant d'effectuer les mesures, nous avons corrigé les effets dus à la température et à la pression ambiante.

Afin de mesurer la première et la deuxième CDA nous avons choisi le plus petit champ possible en deçà du cadre de la pénombre tout en excédant légèrement les dimensions de la chambre Pitman de 3,5 cm³. Nous avons placé les feuilles d'aluminium à 50 cm du foyer, soit à mi-chemin entre le foyer et la chambre d'ionisation.

Le montage utilisé pour mesurer la transmission d'un grand champ primaire d'au moins 30 × 30 cm, ce qui est suffisamment grand selon KELLY *et al.* et selon TROUT *et al.* [4-5] est représenté sur la figure 1. La chambre Pitman

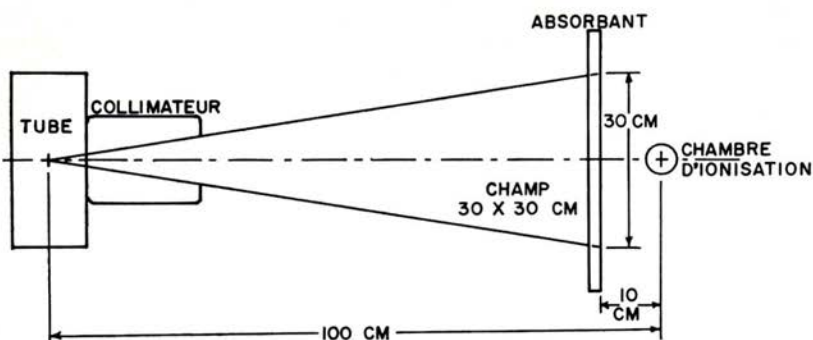


FIG. 1. — Montage utilisé pour mesurer la transmission des rayons X primaires.

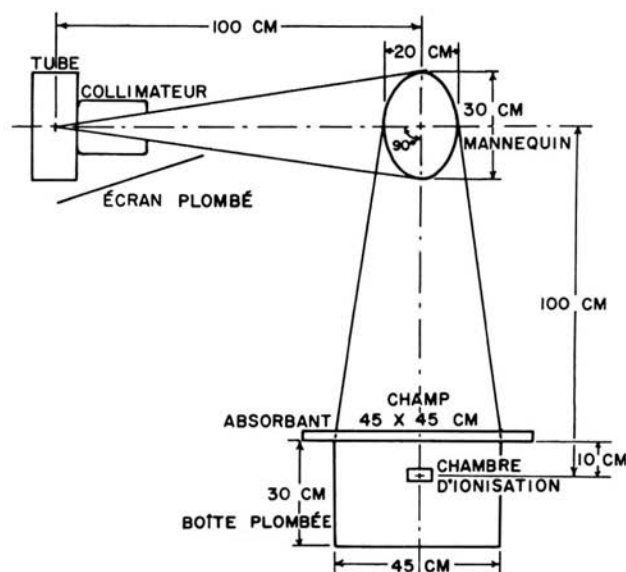


FIG. 2. — Montage utilisé pour mesurer la transmission des rayons X diffusés.

de 35 cm^3 est placée à 1 m de distance du foyer; l'emplacement des feuilles ou des panneaux du milieu absorbant se trouve à 10 cm en deçà du centre de la chambre. Les matériaux utilisés comme témoins sont le plomb laminé et le béton (densité $2,37 \text{ g/cm}^3$), c'est-à-dire qu'à partir des courbes de transmission à travers ces deux matériaux nous avons comparé l'efficacité des autres matériaux. Pour une transmission donnée à travers le matériau choisi on peut déduire l'épaisseur équivalente en plomb ou en béton. Les matériaux que nous

avons étudiés sont les panneaux de gypse (Gyproc) de 9,5 mm et de 16,0 mm d'épaisseur, des panneaux de verre ordinaire de 19 mm d'épaisseur et le plomb acoustique de 0,8 et de 1,6 mm d'épaisseur.

Un panneau de gypse contient environ 79 p. cent de plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$), 7 p. cent de mousse, 5 p. cent d'eau et 0,5 p. cent d'amidon. De chaque côté d'un panneau, il y a une couche de carton dont l'ensemble représente 7,5 p. cent du poids total. La densité globale des panneaux de gypse

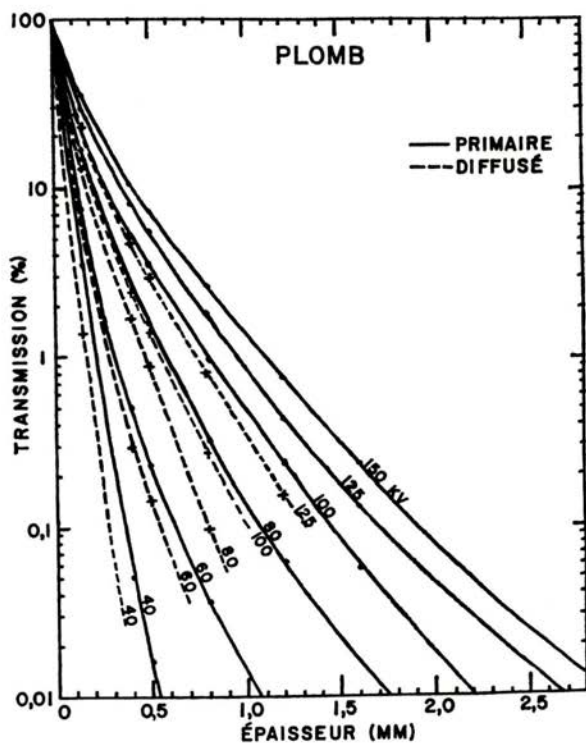


FIG. 3. — Pourcentage de transmission des rayons X primaires et diffusés en fonction de l'épaisseur de plomb à diverses tensions triphasées.

est de $1,4 \text{ g/cm}^3$. La composition des panneaux de verre, de 19 mm d'épaisseur chacun et de densité de $2,6 \text{ g/cm}^3$, est la suivante : 72 p. cent de silice (SiO_2); 13,5 p. cent d'oxyde de calcium (CaO); 12,5 p. cent de carbonate de sodium (Na_2CO_3) et 2 p. cent d'impuretés.

Nous avons effectué les mesures de transmission des grands champs de rayons X diffusés, en exposant à un champ primaire de $30 \times 30 \text{ cm}$ à 100 cm du foyer, un mannequin de masonite de densité unitaire, de section ovale avec des axes de 20 et 30 cm, et de 60 cm de hauteur. La chambre d'ionisation de 350 cm^3 est centrée sur l'axe perpendiculaire à l'axe central du faisceau primaire et à l'axe longitudinal du mannequin, à une distance de 100 cm du centre du

mannequin et à 10 cm de l'absorbant (*fig. 2*). On remarque, notamment, les moyens utilisés pour ne mesurer que les rayons X diffusés par le mannequin. Cela est d'ailleurs confirmé par la mesure d'un bruit de fond négligeable en bloquant complètement l'entrée du faisceau de rayons diffusés dans la boîte par un blindage de plomb très épais.

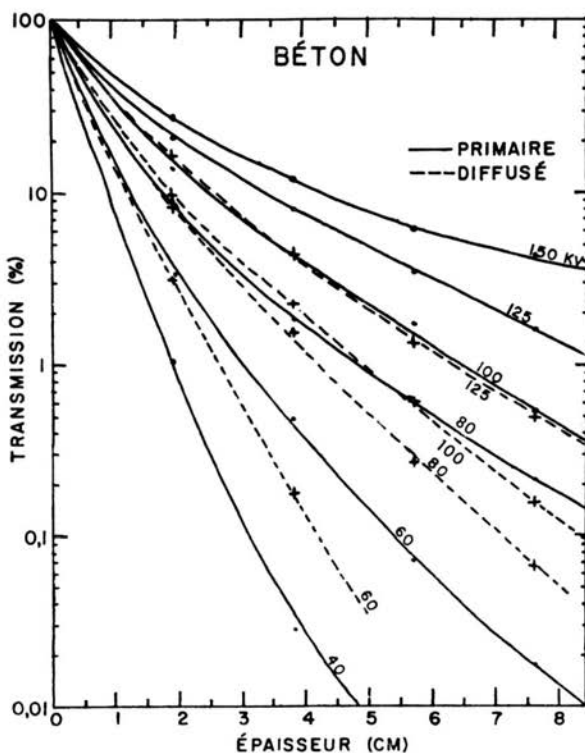


FIG. 4. — Pourcentage de transmission des rayons X primaires et diffusés en fonction de l'épaisseur de *béton* à diverses tensions triphasées.

La contribution, à la chambre d'ionisation, de la diffusion qui provient des cinq parois de plomb a été mesurée. Nous avons trouvé des valeurs de 15, 14, 9, 7, 5 et 7 p. cent de plus que les valeurs dans l'air arrivant au détecteur à des tensions correspondantes de 40, 60, 80, 100, 125 et 150 kV. Nous avons corrigé nos résultats en conséquence.

Nous avons aussi effectué quelques expériences à l'aide d'un appareil triphasé Siemens modèle Mammomat, muni d'un foyer de molybdène et d'un filtre de 0,03 mm de molybdène afin de mesurer la fraction de rayons X diffusés à 1 m de distance d'un sac de plastique rempli d'eau (de la grosseur d'un sein moyen).

TABLEAU II

QUALITÉ ET INTENSITÉ DES RAYONS X PRIMAIRES ET DIFFUSÉS A 90°
A DIVERSES HAUTES TENSIONS POUR DEUX SORTES D'APPAREILS TRIPHASÉS

(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	
						1 ^{er} CDA (mm Al)	2 ^e CDA (mm Al)
Mammographie (prim. 11×17 cm)	30	40	20	0,001 9	0,009 5	—	—
	40	40	40	0,004 2	0,010 5	—	—
Conventionnelle (prim. 30×30 cm)	40	100	1,85	0,003 7	0,20	1,6	2,3
	60	100	3,90	0,010 5	0,27	2,2	3,0
	80	100	7,75	0,027	0,34	2,8	4,1
	100	100	10,25	0,037	0,36	3,8	5,0
	125	100	16,0	0,057	0,35	4,3	5,7
	150	100	22,5	—	—	5,5	7,7

(a) Technique utilisée; (b) Tension (kV); (c) Distance foyer-chambre (cm); (d) Intensité (I_p) des rayons X primaires (mR/mA.s); (e) Intensité (I_d) des rayons X diffusés à 1 m du mannequin (mR/mA.s); (f) Pourcentage des rayons X diffusés à 1 m du mannequin 100 (I_d/I_p); (g) Qualité du faisceau primaire.

Pour la mesure des rayons X primaires, la chambre, de 10 cm de diamètre, est placée sur le plateau à la place du sein. Le faisceau primaire, à ce niveau, est de 10×17 cm. La distance foyer-chambre est de 45 cm. La même chambre de 350 cm³ est utilisée pour la mesure des rayons X diffusés.

RÉSULTATS

Le tableau II résume, sauf pour la mammographie, la qualité des faisceaux primaires utilisés. Entre 40 et 150 kV, la première CDA s'échelonne de 1,6 à 5,5 mm d'aluminium et la deuxième CDA de 2,3 à 7,7 mm d'aluminium.

Sur ce même tableau II se trouvent également les intensités du faisceau primaire, à 1 m du foyer pour l'appareil conventionnel et à 40 cm du foyer pour l'appareil de mammographie. Le tableau II contient aussi les intensités des rayons X diffusés perpendiculairement à l'axe central du faisceau primaire, à 1 m du centre du mannequin, lorsque ce milieu diffusant est exposé à un champ de 30×30 cm pour les techniques ordinaires et à un champ de 11×17 cm en mammographie. On note que pour un fonctionnement à 40 kV, le faisceau primaire est 20 fois plus intense en mammographie que pour les techniques ordinaires. Ceci est dû, au moins en partie, à la plus faible distance foyer-mannequin ainsi qu'à la plus faible filtration totale du faisceau primaire. Par

contre, la nature du foyer qui est en molybdène en mammographie agit théoriquement dans le sens inverse au point de vue des intensités par rapport à l'autre tube muni d'un foyer de tungstène. Les rapports des intensités entre les rayons X diffusés et primaires indiquent que, pour les techniques ordinaires, il y a entre 0,2 et 0,4 p. cent de diffusion pour les hautes tensions de 40 à 125 kV. En mammographie, les rapports sont beaucoup plus petits en raison, entre autres, de la dimension plus petite du milieu diffusant.

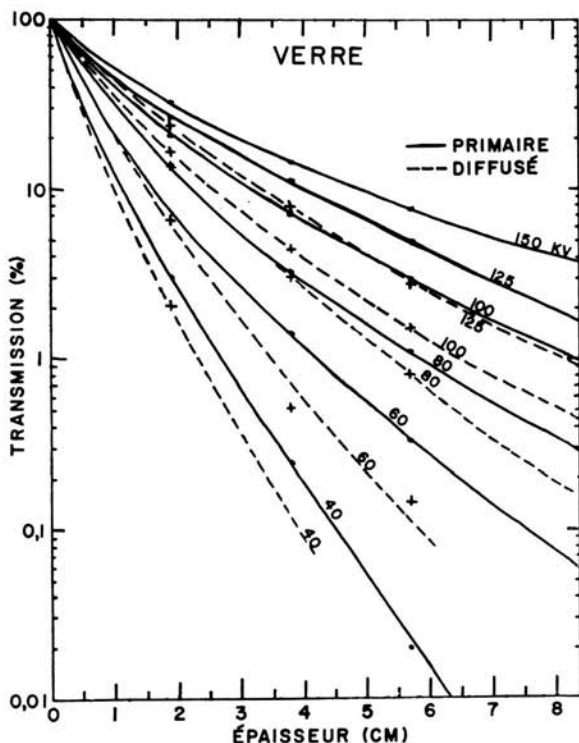


FIG. 5. — Pourcentage de transmission des rayons X primaires et diffusés en fonction de l'épaisseur du verre à diverses tensions triphasées.

La figure 3 illustre le pourcentage de transmission des grands faisceaux de rayons X primaires et diffusés en fonction de l'épaisseur de plomb à diverses hautes tensions de l'appareil triphasé à douze impulsions par cycle. Comme on s'y attendait, les courbes de transmission deviennent moins à pic au fur et à mesure que la haute tension augmente. On remarque également d'après ces courbes que la transmission des rayons X diffusés est à peine plus faible que celle des rayons X primaires, pour une même haute tension au tube radiogène. Cela va de pair avec l'obtention de distributions énergétiques quasi identiques, à certaines hautes tensions, ce qu'avait remarqué WAGGENER *et al.* [7].

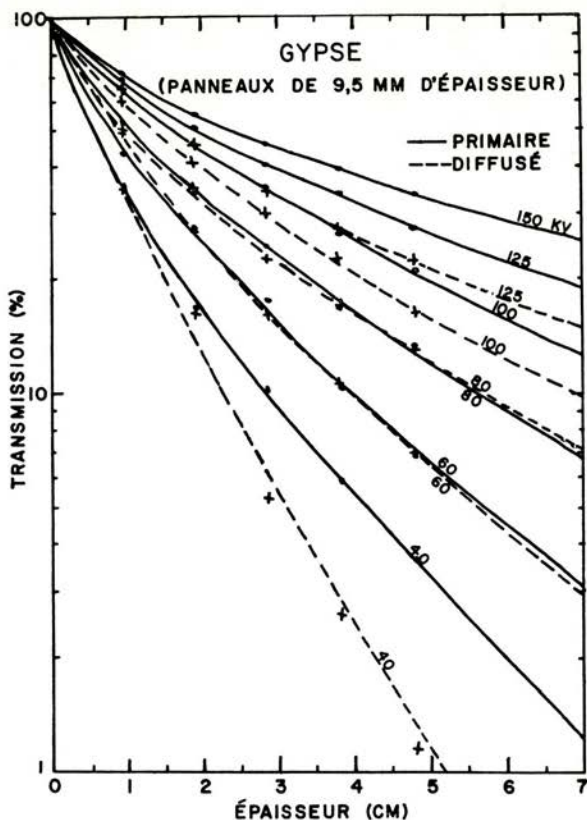


FIG. 6. — Pourcentage de transmission des rayons X primaires et diffusés en fonction de l'épaisseur totale des panneaux de *gypse* (Gyproc) de 9,5 mm d'épaisseur à diverses tensions triphasées.

La figure 4 montre qu'il y a peu de différence dans la transmission par le *béton* entre les rayons X primaires et diffusés quelle que soit la haute tension.

Les figures 5, 6, 7 illustrent successivement les pourcentages de transmission des rayons X primaires et diffusés en fonction des épaisseurs de *verre* ordinaire formées de panneaux de 19 mm d'épaisseur chacun ainsi qu'en fonction des épaisseurs totales des panneaux de *gypse* de 9,5 et de 16 mm d'épaisseur chacun, et ce, pour des hautes tensions de 40 à 150 kV pour les rayons X primaires et de 40 à 125 kV pour les rayons diffusés.

Comme c'est le cas pour le plomb et le *béton*, les courbes de transmission des rayons X primaires et diffusés, pour un matériau particulier, à une haute tension donnée, sont peu éloignées les unes des autres. De plus, les courbes, non exponentielles, tombent également moins rapidement lorsque la haute tension est plus élevée. On voit aussi que la densité et le numéro atomique ont

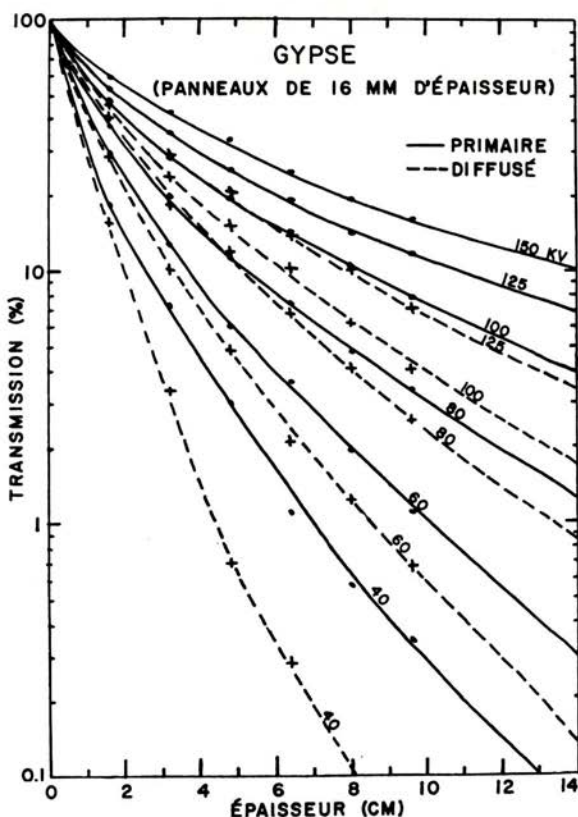


FIG. 7. — Pourcentage de transmission des rayons X primaires et diffusés en fonction de l'épaisseur totale des panneaux de gypse (Gyproc) de 16,0 mm d'épaisseur à diverses tensions triphasées.

une influence sur le pouvoir d'atténuation. Ainsi, pour un grand faisceau primaire ou diffusé, lorsque le tube radiogène fonctionne à une haute tension donnée, le pourcentage de transmission est plus faible pour le plomb que pour le béton, le verre et le gypse.

Le tableau III résume l'ensemble des résultats trouvés lors de ces travaux expérimentaux. Il donne, notamment, les pourcentages de transmission et les équivalences en plomb et en béton des panneaux de verre d'une part et de deux sortes de panneaux de gypse d'autre part, en fonction du voltage pour les rayons X primaires et diffusés d'un appareil triphasé conventionnel. On y remarque que le voltage a peu d'influence sur les équivalences en plomb et en béton et que la façon dont celles-ci varient permet de calculer des équivalences moyennes en plomb et en béton pour les rayons primaires et diffusés. Le tableau IV donne ces équivalences moyennes en plomb et en béton pour le verre ordinaire et le gypse pour les rayons primaires et diffusés.

TABLEAU III

POURCENTAGE DE TRANSMISSION ET ÉQUIVALENCE EN PLOMB ET EN BÉTON D'UN OU PLUSIEURS PANNEAUX DE VERRE ET DE GYPSE EN FONCTION DU VOLTAGE POUR LES GRANDS CHAMPS DE RAYONS X PRIMAIRES ET DIFFUSÉS DES APPAREILS TRIPHASÉS

Matériaux	Épaisseurs (mm)	40 kV prim. 1 ^{re} CDA 1,6 mm Al 2 ^e CDA 2,3 mm Al			40 kV diff.		
		%	mm Pb	cm Béton	%	mm Pb	cm Béton
Verre	19	3,4	0,16	1,25	2,1	0,13	—
	38	0,24	0,32	2,70	—	—	—
	57	0,02	0,48	4,35	—	—	—
Gypse	9,5	35,0	0,05	0,28	35,0	0,02	—
	19	17,5	0,08	0,52	14,5	0,05	—
	28,5	10,0	0,11	0,77	5,8	0,08	—
	38	6,0	0,13	0,97	2,6	0,13	—
	47,5	3,7	0,15	1,20	1,15	0,15	—
Gypse	16	18,5	0,08	0,50	15,6	0,05	—
	32	7,4	0,12	0,88	3,4	0,10	—
	48	3,2	0,16	1,27	0,76	0,17	—
	64	1,13	0,21	1,75	0,26	0,23	—
	80	0,60	0,26	2,18	—	—	—
	96	0,30	0,29	2,57	—	—	—
Plomb acoustique	0,8	0,12	0,57	3,12	—	—	—
	1,6	—	—	—	—	—	—

Matériaux	Épaisseurs (mm)	60 kV prim. 1 ^{re} CDA 2,2 mm Al 2 ^e CDA 3,0 mm Al			60 kV diff.		
		%	mm Pb	cm Béton	%	mm Pb	cm Béton
Verre	19	7,0	0,15	1,40	6,40	0,15	1,38
	38	1,45	0,28	2,65	0,70	0,32	2,83
	57	0,33	0,44	4,07	0,09	0,54	4,35
Gypse	9,5	45,3	0,04	0,28	47,0	0,03	0,30
	19	27,0	0,07	0,55	27,0	0,06	0,55
	28,5	16,7	0,11	0,85	16,7	0,08	0,85
	38	10,2	0,13	1,15	10,5	0,12	1,10
	47,5	7,2	0,15	1,37	6,9	0,14	1,37
Gypse	16	29,0	0,07	0,50	28,0	0,06	0,55
	32	12,5	0,12	1,00	10,2	0,12	1,12
	48	6,6	0,16	1,45	4,8	0,16	1,62
	64	3,7	0,20	1,85	2,45	0,22	2,08
	80	1,95	0,25	2,40	1,23	0,26	2,50
	96	1,12	0,32	2,88	0,67	0,33	2,87
Plomb acoustique	0,8	0,37	0,43	3,97	0,07	≈ 0,6	≈ 4,5
	1,6	0,010	1,08	8,60	—	—	—

TABLEAU III (suite)

Matériaux	Épaisseurs (mm)	80 kV prim. 1 ^{re} CDA 2,8 mm Al 2 ^e CDA 4,1 mm Al			80 kV diff.		
		%	mm Pb	cm Béton	%	mm Pb	cm Béton
Verre	19	14,0	0,17	1,35	13,5	0,14	1,37
	38	3,3	0,37	3,07	2,95	0,33	2,95
	57	1,1	0,55	4,67	0,78	0,52	4,55
Gypse	9,5	53,0	0,05	0,28	53,0	0,04	0,28
	19	34,5	0,08	0,55	34,5	0,07	0,55
	28,5	24,5	0,12	0,80	24,5	0,08	0,80
	38	17,3	0,15	1,15	17,3	0,12	1,15
Gypse	47,5	12,6	0,18	1,45	12,6	0,15	1,45
	16	38,0	0,08	0,48	40,0	0,06	0,45
	32	19,8	0,14	1,00	20,2	0,11	0,97
	48	11,5	0,19	1,55	11,3	0,16	1,57
	64	7,5	0,26	2,00	6,8	0,22	2,05
Plomb acoustique	80	4,8	0,32	2,54	4,1	0,27	2,57
	96	3,4	0,37	3,00	2,55	0,34	3,12
Plomb acoustique	0,8	0,51	0,71	6,05	0,088	≈ 0,83	7,25
	1,6	0,035	1,36	≈ 13	—	—	—

Matériaux	Épaisseurs (mm)	100 kV prim. 1 ^{re} CDA 3,8 mm Al 2 ^e CDA 5,0 mm Al			100 kV diff.		
		%	mm Pb	cm Béton	%	mm Pb	cm Béton
Verre	19	21,0	0,16	1,30	16,0	0,15	1,30
	38	7,2	0,35	3,00	4,4	0,32	2,87
	57	3,0	0,53	4,60	1,5	0,48	4,40
Gypse	9,5	64,0	0,04	0,22	62,0	0,04	0,20
	19	46,0	0,07	0,48	44,0	0,06	0,44
	28,5	35,0	0,10	0,75	31,5	0,08	0,70
	38	27,5	0,13	1,00	22,8	0,12	0,98
Gypse	47,5	21,0	0,16	1,31	16,2	0,15	1,25
	16	47,0	0,07	0,50	44,0	0,06	0,43
	32	28,5	0,12	0,95	23,8	0,12	0,92
	48	19,5	0,17	1,45	15,2	0,16	1,35
	64	14,0	0,22	1,92	10,0	0,21	1,80
Plomb acoustique	80	10,2	0,28	2,32	6,4	0,25	2,35
	96	8,1	0,33	2,78	4,2	0,32	2,92
Plomb acoustique	0,8	1,36	0,72	6,05	0,28	0,78	6,78
	1,6	0,17	1,28	≈ 10	—	—	—

TABLEAU III (suite et fin)

Matériaux	Épaisseurs (mm)	125 kV prim. 1 ^{re} CDA 4,3 mm Al 2 ^e CDA 5,7 mm Al			125 kV diff.		
		%	mm Pb	cm Béton	%	mm Pb	cm Béton
Verre	19	27,00	0,15	1,50	23,0	0,14	1,35
	38	11,3	0,32	3,10	7,6	0,51	2,90
	57	5,0	0,52	4,80	2,75	0,51	4,60
Gypse	9,5	69,0	0,04	0,25	64,0	0,04	0,25
	19	51,0	0,07	0,55	46,0	0,07	0,55
	28,5	40,5	0,10	0,85	34,7	0,10	0,85
	38	33,5	0,12	1,15	27,8	0,12	1,15
	47,5	27,5	0,15	1,45	22,0	0,15	1,40
Gypse	16	54,0	0,05	0,48	47,5	0,06	0,51
	32	36,0	0,12	1,00	30,0	0,11	1,00
	48	25,5	0,16	1,55	20,5	0,15	1,50
	64	19,0	0,22	2,10	14,0	0,21	2,00
	80	14,2	0,28	2,65	9,9	0,25	2,48
	96	11,8	0,32	3,03	7,1	0,32	3,00
Plomb acoustique	0,8	1,97	0,78	7,1	0,89	0,76	6,43
	1,6	0,18	1,47	≈ 13	—	—	—

Matériaux	Épaisseurs (mm)	150 kV prim. 1 ^{re} CDA 5,5 mm Al 2 ^e CDA 7,7 mm Al		
		%	mm Pb	cm Béton
Verre	19	32,0	0,15	1,55
	38	14,5	0,32	3,30
	57	7,5	0,50	5,20
Gypse	9,5	71,5	0,04	0,26
	19	56,0	0,07	0,55
	28,5	46,0	0,11	0,85
	38	39,5	0,13	1,13
	47,5	34,0	0,15	1,40
Gypse	16	60,0	0,07	0,48
	32	43,0	0,12	0,97
	48	32,0	0,16	1,55
	64	25,0	0,21	2,07
	80	20,0	0,25	2,55
	96	16,8	0,30	3,05
Plomb acoustique	0,8	2,63	0,81	≈ 10
	1,6	0,22	1,62	≈ 16

TABLEAU IV

ÉQUIVALENCE MOYENNE EN PLOMB ET EN BÉTON D'UN OU PLUSIEURS PANNEAUX DE VERRE ET DE GYPSE POUR DES GRANDS CHAMPS DE RAYONS X PRIMAIRES ET DIFFUSÉS DES APPAREILS TRIPHASÉS

Matériaux	Nombre de panneaux	Épaisseurs (cm)	Rayons X primaires		Rayons X diffusés	
			40 à 150 kV	40 à 150 kV	40 à 125 kV	60 à 125 kV
			mm Plomb	cm Béton	mm Plomb	cm Béton
Verre ordinaire	1	1,9	0,16	1,4	0,14	1,3
	2	3,8	0,32	3,0	0,32 (*)	2,9
	3	5,7	0,50	4,6	0,51 (*)	4,5
Gypse (Gyproc)	1	0,95	0,04	0,25	0,03	0,26
	2	1,9	0,07	0,55	0,06	0,52
	3	2,85	0,11	0,81	0,08	0,80
	4	3,8	0,13	1,1	0,12	1,1
	5	4,75	0,15	1,4	0,15	1,4
Gypse (Gyproc)	1	1,6	0,07	0,5	0,06	0,5
	2	3,2	0,12	1,0	0,11	1,0
	3	4,8	0,17	1,5	0,16	1,5
	4	6,4	0,22	1,9	0,22	2,0
	5	8,0	0,24	2,4	0,27 (*)	2,5
	6	9,6	0,32	2,9	0,33 (*)	3,0

N.B. : Densité du verre : 2,6 g/cm³; Densité du gypse : 1,4 g/cm³.

(*) 60 à 125 kV.

En comparant (tableau IV) le verre au béton, on voit qu'il a une équivalence moyenne de 1,3 cm de verre par centimètre de béton lorsqu'il est soumis aux rayons X primaires ou diffusés. Notons qu'au tableau IV les épaisseurs de plomb ou de béton de chacune des quatre dernières colonnes ont été calculées pour chacune des valeurs des voltages et des épaisseurs qui figurent au tableau III.

Les panneaux de verre de 1,9 cm d'épaisseur chacun ont des équivalences moyennes de 0,16 mm de plomb par panneau et de 1,4 cm de béton par panneau, tant pour les rayons X primaires que diffusés.

Le tableau IV permet d'évaluer l'équivalence moyenne du gypse par unité d'épaisseur de plomb ou de béton. Pour les rayons X primaires, on obtient une équivalence de 280 mm de gypse (de 0,95 et de 1,6 cm d'épaisseur) par millimètre de plomb alors qu'il est de 307 mm de gypse par millimètre de plomb pour des rayons X diffusés, l'épaisseur totale de gypse étant limitée à environ 10 cm. Par rapport au béton, le tableau IV nous donne une équivalence d'environ 3,4 cm de gypse par centimètre de béton, que ce soit pour des grands champs de rayons X primaires ou diffusés.

Les panneaux de gypse de 0,95 cm sont équivalents, chacun, pour les rayons X primaires, à une épaisseur de plomb comprise entre 0,04 et 0,03 mm quand on passe de 1 à 5 panneaux et à environ 0,03 mm pour les rayons X diffusés (tableau IV).

Les panneaux de gypse de 1,6 cm d'épaisseur sont équivalents chacun, quand on passe de 1 à 6 panneaux, à une épaisseur de plomb comprise entre 0,07 et 0,05 mm pour les rayons X primaires et à une épaisseur de plomb comprise entre 0,06 et 0,05 mm pour les rayons X diffusés.

Pour les rayons X primaires comme pour les rayons X diffusés, l'épaisseur de béton équivalente est de 0,27 cm pour les panneaux de gypse de 0,95 cm et de 0,5 cm pour ceux de 1,6 cm. Ces variations des valeurs moyennes pour un matériau donné ne sont pas significatives en raison des valeurs fluctuantes dans la gamme des tensions utilisées ainsi qu'en raison du mode de détermination.

Au sujet du plomb acoustique utilisé comme matériel de blindage, on voit à partir du tableau III que les équivalences en plomb des épaisseurs de 0,8 mm et de 1,6 mm augmentent avec la haute tension de 0,43 à 0,81 mm d'une part et de 1,08 à 1,62 mm d'épaisseur d'autre part. Ce travail permet de conclure que le plomb acoustique est un matériau, qui malgré une densité égale à celle du plomb laminé, est nettement inacceptable comme matériau de blindage en raison des différences d'épaisseur sur la surface plombée ainsi qu'en raison de la porosité, surtout lorsque la feuille de plomb est très mince telle que 0,4 ou 0,8 mm.

La plus grande transmission observée pour du plomb d'épaisseur non homogène s'explique par le fait que la transmission à travers les zones amincies excède significativement la diminution de transmission à travers les zones épaisses d'une même feuille. Toute courbe de transmission atteste ceci. Notons, toutefois, qu'il est difficile de déterminer de façon précise des épaisseurs équivalentes lorsque les rayonnements sont transmis à une intensité inférieure à un centième des rayonnements incidents. C'est sans doute ce qui explique les erreurs expérimentales plus grandes obtenues aux faibles tensions (transmissions comprises entre 10^{-4} et $4 \cdot 10^{-3}$ par exemple).

En mammographie, l'appareil à notre disposition ne nous permet pas d'obtenir de grands champs de rayons X primaires au travers du verre et du gypse. Pour les rayons X diffusés au travers du verre, la sensibilité de notre appareil de mesure n'est pas suffisante pour mesurer avec assez de précision les très faibles intensités transmises au travers du verre. Quant aux rayons X diffusés au travers d'un à trois panneaux de gypse de 16 mm d'épaisseur, nous trouvons des pourcentages de transmission à 40 kV de 1,9, 0,4 et 0,1 comparativement à 15,6, 3,4 et 0,76 par la technique conventionnelle (*cf.* tableau III).

DISCUSSION

Il est difficile de comparer directement nos résultats pour le cas du verre à ceux déjà publiés par TROUT *et al.* [5] ainsi qu'à ceux de O'RIORDAN et CATT [4]. Ces derniers ont utilisé un appareil triphasé à très faible filtration, tandis que TROUT *et al.* ont travaillé avec un appareil monophasé filtré

normalement. Le faisceau que nous avons utilisé avait une dureté de rayonnement supérieure à celle des deux faisceaux précédents; ceci explique que nous ayons obtenu des pourcentages de transmission plus élevés (tableau I) pour les mêmes épaisseurs de verre. Comme TROUT *et al.* l'avaient déjà montré, le verre est un peu moins efficace que le béton, pour une tension donnée. Le travail actuel illustre le fait qu'il ne suffit pas d'évaluer les épaisseurs de verre en multipliant les épaisseurs de béton par le rapport inverse des densités de ces matériaux, ce qui entraînerait une sous-évaluation de l'épaisseur pouvant aller jusqu'à 20 p. cent.

Au sujet des panneaux de gypse, ils s'emploient comme supports pour le plomb, comme matériaux de structure, d'insonorisation ou de finition. En pratique, il peut y avoir jusqu'à quatre panneaux entre deux salles. Ce travail montre que les panneaux de gypse peuvent être complémentaires pour le blindage des salles où se trouvent des appareils de mammographie, de rayons X dentaires à environ 60 kV et d'autres sources de rayons X mous. L'utilisation de ce pouvoir de blindage suppose naturellement une installation où l'on a pris la précaution d'éliminer les fuites aux joints, aux perforations, etc. Notons, toutefois, que les valeurs citées dans ce travail s'appliquent à des panneaux de gypse ayant une composition bien déterminée.

Quoique tous les résultats de ce travail s'appliquent aux grands champs de rayons X primaires et diffusés provenant des appareils triphasés, ils sont également valables pour les rayons X provenant d'appareils monophasés à potentiel constant.

Si on applique ces résultats au cas des appareils produisant des rayons X très mous en raison soit de la faible filtration totale, soit de la nature du foyer qui peut être en molybdène ou en un autre matériau de numéro atomique plus faible que celui du tungstène, on détermine des épaisseurs de blindage supérieures aux valeurs nécessaires, ce qui va dans le sens de la sécurité. Ceci est très bien illustré par les résultats que nous avons obtenus avec un appareil de mammographie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Gouvernement du Québec. Loi de la qualité de l'environnement, Chap. 49, 1972.
- [2] KELLEY, J. P., TROUT, D. Broad-beam attenuation in lead for X-rays from 50 to 300 kVp, *Radiology*, 1972, **104**, 171-175.
- [3] National Council on Radiation Protection and Measurements. Medical X-ray and gamma-ray protection for energies up to 10 MeV, Structural shielding design. *NCRP Report n° 34*, 1970, 116 p.
- [4] O'RIORDAN, M. C., CATT, B. R. Low energy X-ray shielding with common materials. *Health Physics*, 1969, **17**, 516-518.
- [5] TROUT, E. D., KELLEY, J. P., LARSON V. L. The use of plate glass as shielding material in diagnostic radiologic installations. *J. Can. Ass. Radiol.*, 1974, **25**, 173-177.
- [6] Union technique de l'Électricité. Installations pour la production et l'utilisation de rayons X, *Norme française C 15-160*, novembre 1958, édition 1961.
- [7] WAGGENER R. G., LEVY, L. B., ZANCA, P. Spectra of scattered diagnostic X-rays from an Alderson phantom, *Health Physics*, 1973, **24**, 59-70.