

ARTICLE

Irradiation du personnel en neuroradiologie interventionnelle pédiatrique : focus sur le cristallin de l'opérateur

C. Bolomey¹, G. Fasel¹, N. Ryckx² et R. Le Coultre^{1*}

¹ Haute École de Santé Vaud (HESAV), Haute École Spécialisée de Suisse Occidentale (HES-SO), Lausanne, Suisse.

² Institut de Radiophysique (IRA), Centre Hospitalier Universitaire Vaudois (CHUV), Lausanne, Suisse.

Reçu le 30 décembre 2015 – Accepté le 7 juin 2016

Résumé – Précédemment fixée à 150 mSv an⁻¹, la CIPR recommande dorénavant de limiter la dose équivalente au cristallin à 20 mSv an⁻¹. En neuroradiologie interventionnelle pédiatrique, l'irradiation du cristallin de l'opérateur peut être majorée par l'utilisation d'un système de radioscopie biplan et par la plus grande proximité du médecin avec le patient. En pratique, l'efficacité des lunettes plombées dépend de nombreux facteurs. La présente étude traite ces deux aspects. Premièrement, la dose au cristallin d'un neuroradiologue a été mesurée, durant 12 interventions, à l'aide de 36 TLD placés sur son bonnet chirurgical. Dans un deuxième temps, en vue de déterminer l'efficacité des lunettes plombées, des mesures ont été effectuées en reproduisant les conditions cliniques. Un détecteur a été placé sur l'œil gauche d'un fantôme représentant l'opérateur. Quatre paires de lunettes plombées ont été sélectionnées en vue de tester différents paramètres. Pour les 12 interventions, un équivalent de dose individuel Hp(0,07) de 457 μSv pour le cristallin côté tube a été obtenu. Cette étude démontre un ratio dose au cristallin / PDS 5 fois plus élevé que lors d'interventions réalisées chez des patients adultes. La dose au cristallin peut être réduite d'environ un facteur 3 avec l'utilisation de lunettes plombées adaptées. Le modèle de lunettes le plus couvrant atténue jusqu'à 50 % de plus qu'un modèle moins couvrant. L'ajout d'une protection latérale permet d'augmenter l'atténuation jusqu'à 13 % comparé au même modèle sans protection latérale.

Abstract – **Staff exposure in pediatric interventional neuroradiology: focus on the operator's eye lens.** Previously at 150 mSv year⁻¹, the ICRP now recommends limiting the equivalent dose to the eye lens to 20 mSv year⁻¹. For pediatric interventional neuroradiology, the exposure of the operator's eye lens may be increased by the use of a biplane fluoroscopy system and by the proximity of the physician to the patient. In practice, the efficiency of leaded glasses depends on many factors. This study addresses both aspects. First, the eye lens dose of a neuroradiologist was measured during 12 procedures using 36 TLDs placed on his surgical cap. Secondly, in order to determine the efficiency of leaded glasses, measurements were carried out by reproducing the clinical conditions. A detector was placed on the left eye of a phantom representing the operator. Four pairs of leaded glasses were selected to test various parameters. During the 12 procedures, an individual dose equivalent Hp(0.07) of 457 μSv was obtained for the eye lens closest to the tube. This study shows an eye lens dose to DAP ratio 5 times higher than for procedures performed on adult patients. The eye lens dose might be reduced by a factor of approximately 3 with the use of appropriate leaded glasses. The eyewear model with the most coverage reduces the dose by up to 50% more than the model with the least coverage. The addition of lateral protection increases the attenuation by up to 13% compared with the same model without side protection.

Keywords: radiation protection / leaded glasses / radiology / eye lens dose / neuroradiology / pediatrics

1 Introduction

Anciennement de 150 mSv an⁻¹, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) recommande dorénavant de limiter la dose équivalente au cristallin à

20 mSv an⁻¹. Cette modification conduit à de nombreuses pré-occupations concernant l'irradiation du cristallin du personnel médical. Alors que leur efficacité est clairement démontrée, le port de lunettes plombées n'est pourtant pas suffisamment appliqué en routine. L'étude ORAMED met ainsi en évidence que 24 % des opérateurs considérés sont susceptibles de dépasser la nouvelle limite de 20 mSv an⁻¹. De plus, seuls 31 %

* regis.lecoultre@hesav.ch

des opérateurs en radiologie interventionnelle portent systématiquement des lunettes de protection (Vanhavere *et al.*, 2012).

En radiologie interventionnelle pédiatrique, l'exposition de l'opérateur peut être d'autant plus conséquente du fait de l'utilisation fréquente d'un système de radioscopie biplan et de la plus grande proximité du médecin avec le patient (Vaño *et al.*, 2009).

En radioprotection, l'efficacité des différents moyens de protection dépend de nombreux paramètres. Pour l'exposition du cristallin, le choix du modèle de lunettes plombées utilisées influence grandement sa protection et devrait être effectué de manière éclairée.

Cette étude porte sur ces deux thématiques intrinsèquement liées. Tout d'abord, la dose au cristallin d'un neuroradiologue exerçant en pédiatrie a été mesurée au moyen de dosimètres thermoluminescents (TLD) placés à différents endroits sur un bonnet chirurgical, mesurant ainsi l'exposition du cristallin en l'absence de lunettes de protection. Ce praticien utilisant systématiquement des lunettes plombées, il a également été choisi de se pencher sur l'efficacité de ces dernières ainsi que les différents paramètres d'influence. Pour ce faire, quatre paires différentes ont été évaluées en reproduisant les conditions cliniques observées durant la première partie de l'étude.

L'apport aux travaux existants de cette étude est l'articulation dans un contexte clinique bien délimité de la problématique de l'évaluation de la dose au cristallin conjuguée avec la problématique de l'efficacité des lunettes plombées portées en pratique. Les résultats présentés ne remettent nullement en cause les connaissances amenées par les travaux existants, mais vise à apporter un éclairage du terrain, une étude de cas, de la complexité inhérente aux situations de travail rencontrées en radiologie interventionnelle.

2 Matériel et méthode

2.1 Mesure de la dose au cristallin

Pour ces mesures, 36 détecteurs thermo-luminescents (TLD) de type LiF :Mg,Cu,P (MCP-N, TLD Poland, Pologne, <http://www.tld.com.pl/tld/mcpns.html>) ont été répartis sur un bonnet chirurgical. Ils ont été placés à raison de 12 dosimètres positionnés respectivement au niveau de l'œil gauche, au centre et au niveau de l'œil droit de l'opérateur (Figure 1). Ce dernier a porté le bonnet muni des détecteurs pendant 12 interventions de neuroradiologie pédiatrique.

Sur les 12 interventions, 10 ont été réalisées sur un système biplan et 2 sur un système monoplan. Le produit dose-surface (PDS) de chaque intervention a été relevé directement sur l'installation de radioscopie. L'installation a été utilisée selon les réglages standards utilisés en neuroradiologie interventionnelle pédiatrique dans l'institution. La modulation automatique de dose (AEC, automatic exposure control) contrôlait le débit au patient – et ainsi le PDS – tout au long de la procédure. Les PDS ont été relevés tels qu'indiqué par l'installation de radioscopie. L'étalonnage du système de mesure du PDS de l'installation a été effectué conformément à la législation en vigueur.

Les TLD nécessitant d'être lus relativement rapidement après la première irradiation, les 12 interventions ont été fractionnées en 3 mesures, comprenant chacune 4 interventions. Les dosimètres ont été utilisés sur une période maximale de 6 semaines entre l'étalonnage et la lecture. La lecture des dosimètres par l'Institut de Radiophysique de Lausanne sur un lecteur Harshaw s'est effectuée au moins 24 h après la dernière irradiation, mais dans le mois qui l'a suivie, permettant ainsi à la réponse de se stabiliser ainsi qu'il est d'usage pour la dosimétrie TLD. Il faut noter qu'il est également important de procéder à une lecture rapide des TLD MCP suite à leur « mise à zéro » afin d'éviter que les faibles doses mesurées ne soient cachées par l'incertitude sur le bruit de fond. L'étalonnage de la chaîne de lecture des TLD est traçable à un étalon primaire selon la législation suisse en vigueur. La réponse des TLD est exprimée en termes de Hp(0,07), leur étalonnage initial effectué au Co-60 étant corrigé par un facteur correspondant à un champ de rayonnement X d'énergie moyenne inférieure à 100 keV. Un étalonnage en termes de Hp(3) plutôt que Hp(0,07) aurait probablement été plus adéquat, mais l'institut en question n'offre pour l'heure pas encore cette possibilité. L'utilisation du Hp(0,07) à la place du Hp(3) reste toutefois acceptable dans les conditions de mesure de la radiologie interventionnelle comme démontré dans l'étude ORAMED (Vanhavere *et al.*, 2012).

Dans la suite de l'article, la dénomination suivante est utilisée : mesure 1 = interventions 1–4 ; mesure 2 = interventions 5–8 ; mesure 3 = interventions 9–12.

2.2 Efficacité des lunettes plombées

Les mesures d'efficacité des lunettes plombées ont été réalisées en reproduisant les conditions cliniques observées durant la mesure de la dose au cristallin. À partir de données relevées durant les interventions, la position et l'angulation des tubes, la hauteur de la table d'examen ainsi que les différents paramètres d'acquisitions ont alors été déterminés. Un dosimètre électronique (Unfors NED, http://www.rosalina.in/Unfors/ned_sensorchar.pdf) étalonné en termes de Hp(0,07), deux fantômes anthropomorphes adultes représentant respectivement le patient et l'opérateur ainsi que quatre différentes paires de lunettes plombées ont été utilisés. Afin d'être conservatif, c'est donc un fantôme de tête anthropomorphe adulte qui a été utilisé pour simuler le diffusé généré par un patient pédiatrique, le crâne atteignant assez rapidement son diamètre de l'âge adulte. Le dosimètre Unfors NED n'était, lui, pas rattaché à une chaîne métrologique conformément à la législation en vigueur. Néanmoins, un étalonnage en conditions contrôlées par le même institut ayant fourni les TLD a permis de vérifier la stabilité ainsi que la reproductibilité des mesures. Les résultats étant indiqués en valeurs relatives, les facteurs d'étalonnage se simplifient dans les équations.

Les lunettes ont été choisies afin de tester différents paramètres pouvant influencer leur efficacité. Il a été montré que la surface couverte par les lunettes plombées jouait un rôle important dans la protection du cristallin. De même, l'efficacité des lunettes plombées est fortement influencée par l'orientation de la tête de l'opérateur par rapport à la source de rayonnement diffusé. En effet, l'angle entre l'opérateur et la source

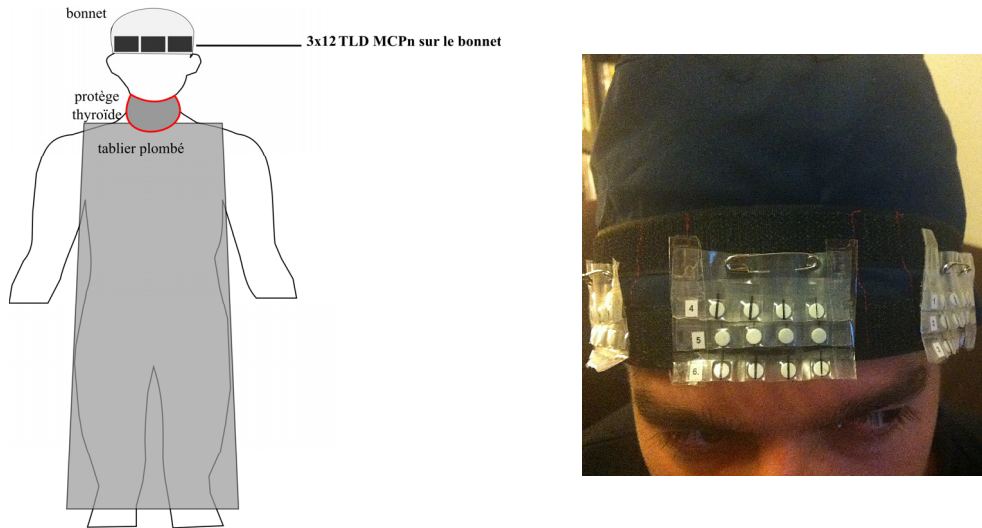


Figure 1. Répartition et disposition des différents dosimètres.
Distribution and position of different dosimeters.

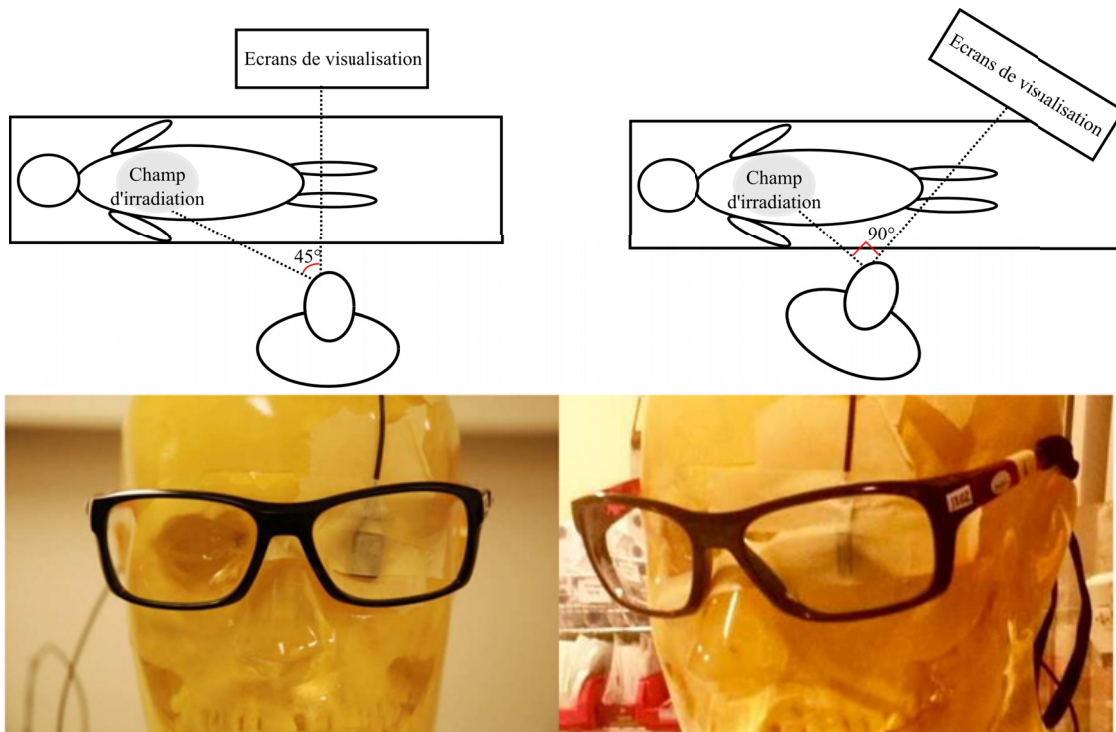


Figure 2. Orientation de l'opérateur par rapport à la source de rayonnement diffusé.
Operator orientation with respect to the source of scattered radiation.

de rayonnement diffusé peut varier de 45° à 90° en fonction du type d'intervention ou de la taille du patient (Figure 2). À 90°, le modèle le moins couvrant présente un facteur d'atténuation du rayonnement diffusé de 1,4 par rapport aux deux autres modèles testés, qui présentent respectivement des facteurs de 2,6 et 3,9 selon les paires de lunettes (Sturchio *et al.*, 2013).

L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique mentionne également que la surface couverte par les lunettes plombées est un facteur important et que les conditions d'irradiation, ainsi que l'orientation par rapport à l'opérateur, doivent être prises

en compte dans le choix des lunettes de protection (IAEA, 2013).

À partir de ces données, il a été choisi de comparer un modèle standard avec un modèle plus couvrant afin de mettre en évidence la contribution de la surface des verres dans la protection du cristallin.

Afin de connaître l'apport réel d'une protection latérale, deux lunettes d'un même modèle ont été testées, équipées ou non d'une protection latérale de 0,5 mm d'équivalent de plomb (mmEqPb).

Tableau 1. Caractéristiques des lunettes sélectionnées.
Characteristics of the selected glasses.



| Lunettes n° | Modèle | Épaisseur | Protection | Surface max. du verre [cm ²] | Image |
|-------------|-----------|---------------|---------------|--|---|
| | | EqPb [mmEqPb] | latérale | | |
| 1 | Sport | 0,75 | Oui (05 mmPb) | 18 |  |
| 2 | Sport | 0,75 | Non | 18 | |
| 3 | Classique | 0,5 | Non | 21 |  |
| 4 | Classique | 0,75 | Non | 21 | |

Tableau 2. PDS et Kerma air cumulé des 12 interventions.
DAP and cumulative air Kerma of 12 procedures.

| Intervention | PDS cumulé [mGy cm ²] | Kerma air cumulé tube frontal [mGy] | Kerma air cumulé tube latéral [mGy] | Kerma air cumulé [mGy] <i>Système monoplan</i> |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 | 27 964 | | | 331,7 |
| 2 | 21 787 | 258,3 | 71,7 | |
| 3 | 22 288 | 236,6 | 98,2 | |
| 4 | 18 367 | 250,2 | 78,5 | |
| 5 | 50 641 | | | 482,8 |
| 6 | 15 673 | 191,3 | 76,8 | |
| 7 | 52 290 | 351,2 | 151,8 | |
| 8 | 42 675 | 477,8 | 125,3 | |
| 9 | 70 122 | 512,7 | 261,6 | |
| 10 | 26 282 | 222,8 | 114,0 | |
| 11 | 26 805 | 101,7 | 111,4 | |
| 12 | 24 987 | 222,7 | 134,3 | |

En effet, l'épaisseur d'équivalent de plomb n'est pas un paramètre fiable à des fins d'estimation d'efficacité des lunettes plombées, notamment à cause de l'importante contribution du rétrodiffusé ainsi que des potentiels rayons non atténués arrivant par le côté participant à l'irradiation du cristallin (Sturchio *et al.*, 2013). De ce fait, il a été décidé de tester ce paramètre en utilisant deux paires de lunettes similaires, mais présentant une fois 0,5 mmEqPb et une fois 0,75 mmEqPb. Le choix des lunettes s'est donc effectué selon plusieurs critères distincts : l'influence de la surface protectrice, la contribution d'une protection latérale et l'influence de l'épaisseur d'équivalent de plomb des verres.

Les 4 paires de lunettes choisies ont été fournies par la société Scanflex-SIRAD :

- 2 paires de lunettes du modèle « spor » Ultralite 9941 (Protech, USA) avec et sans protection latérale. La protection latérale est composée d'une petite plaque d'une épaisseur de 0,5 mmEqPb.
- 2 autres paires de lunettes du modèle « classiqu » Sx-0.5 et Sx-0.75 (APX, France) avec 0,5 et 0,75 mmEqPb.

Le Tableau 1 liste les différentes paires de lunettes utilisées pour cette étude, les numéros par lesquelles elles sont identifiées dans la suite du document ainsi que leurs caractéristiques.

Pour commencer, la paire de lunettes n° 1 a été placée sur le fantôme anthropomorphe représentant l'opérateur. Le patient simulé a été irradié, en mode graphique, jusqu'à obtenir 450 μ Sv au niveau de l'œil gauche de l'opérateur. Le temps d'exposition nécessaire a été relevé, puis l'opération a été répé-

tée avec les 3 autres paires de lunettes, en utilisant strictement les mêmes conditions d'irradiation. C'est le temps d'irradiation qui a servi de référence.

L'efficacité des lunettes plombées a été testée pour des acquisitions avec le tube frontal et latéral séparément, ainsi que pour une acquisition réalisée en biplan. Chaque mesure a été réalisée pour les deux orientations de la tête de l'opérateur, à 45° et 90° par rapport à la source.

Chaque mesure a été réalisée deux fois et l'atténuation des lunettes plombées a été calculée par le rapport des doses avec et sans protection plombée. Le résultat final a été déterminé par les valeurs obtenues moyennées sur les deux mesures. L'exposition du cristallin est exprimée en normalisant la dose cumulée par le PDS du patient et exprimé en μ Sv/(Gy cm²), un rapport utilisé de manière standard en radiologie interventionnelle et nommé facteur d'exposition (Schueler *et al.*, 2006).

3 Résultats

3.1 Mesure de la dose au cristallin

La moyenne des résultats des trois différentes mesures a premièrement été effectuée. Le PDS cumulé des différentes interventions est résumé dans le Tableau 2. Le Tableau 3 présente les moyennes des équivalents de dose individuelle Hp(0,07) des différentes mesures des yeux en fonction de leur localisation ainsi que les facteurs d'exposition obtenus en divisant

Tableau 3. Moyenne des équivalents de dose individuel Hp(0,07) au niveau des yeux en fonction de la localisation des TLD, ainsi que les facteurs d'exposition du cristallin obtenus en divisant le cumul de dose TLD par le cumul de PDS des trois groupes d'interventions tels que listés dans le Tableau 2. L'incertitude élargie ($k = 2$) liée au TLD s'élève à 11 %.

Average individual dose equivalents Hp(0.07) of the eyes as a function of the location of the TLDs, and the eye lens exposure factors obtained by dividing the cumulative TLD doses by the respective cumulative DAP of the three groups of procedures, as listed in Table 2. The expanded uncertainty ($k = 2$) related to the TLD is 11%.

| Emplacement des TLD | Mesure n° | Moyenne Hp(0,07) [μ Sv] (CI 95 %) | Facteur d'exposition [μ Sv/(Gy cm ²)] |
|---------------------|-----------|--|--|
| Gauche | 1 | 141 ± 7 (136, 146) | 12 |
| | 2 | 134 ± 8 (129, 139) | 12 |
| | 3 | 218 ± 10 (212, 224) | 19 |
| Centre | 1 | 127 ± 7 (123, 131) | 0,8 |
| | 2 | 115 ± 9 (109, 121) | 0,7 |
| | 3 | 178 ± 12 (171, 185) | 11 |
| Droite | 1 | 51 ± 16 (41, 61) | 0,3 |
| | 2 | 28 ± 9 (22, 34) | 0,2 |
| | 3 | 37 ± 8 (32, 42) | 0,2 |
| Moy. gauche | | 457 ± 27 | 12 |
| Moy. droite | | 268 ± 30 | 0,6 |

le cumul de Hp(0,07) des trois groupes d'interventions par le cumul des PDS des interventions résumées dans le Tableau 2.

En vue d'estimer la dose reçue par le cristallin de l'œil gauche, une moyenne des valeurs des TLD placés sur la gauche avec ceux placés au centre a été effectuée. Pour le cristallin de l'œil droit, c'est la moyenne des TLD placés à droite avec ceux du centre qui a été effectuée.

La dose totale au cristallin a ensuite été déterminée par la somme des moyennes des trois mesures. L'équivalent de dose individuelle Hp(0,07) obtenu est de $457 \pm 27 \mu$ Sv pour l'œil gauche et de $268 \pm 30 \mu$ Sv pour l'œil droit.

3.2 Efficacité des lunettes plombées

Afin de pallier une exposition du cristallin potentiellement élevée au cours d'une carrière, la protection offerte par des lunettes plombées est un atout non négligeable en neuro-radiologie interventionnelle. Ainsi, les résultats des mesures concernant l'évaluation de l'efficacité des différentes paires de lunettes plombées sont indiqués dans le Tableau 4 selon l'orientation de la tête de l'opérateur, pour chaque paire de lunettes ainsi que pour chaque tube utilisé (tube frontal, latéral et biplan).

4 Discussion

4.1 Mesure de la dose au cristallin

4.1.1 Dose par intervention et « spécificité » des interventions pédiatriques

Il a été obtenu respectivement $38 \pm 2 \mu$ Sv par procédure pour l'œil côté tube et $22 \pm 3 \mu$ Sv par procédure pour l'œil opposé. Ces valeurs représentent une irradiation du cristallin sans lunettes plombées mais avec l'utilisation de moyens de protection structurels (écran mobile 0,5 mmEqPb, tablier 0,5 mmEqPb et protège thyroïde 0,5 mmEqPb). Sur un

total de 104 procédures pédiatriques effectuées en 2014 sur cette installation, cela équivaldrait à un total théorique de $4,0 \text{ mSv an}^{-1}$ pour l'œil côté tube et $2,3 \text{ mSv an}^{-1}$ pour l'œil opposé pour la seule neuroradiologie pédiatrique.

Les interventions pédiatriques peuvent être considérées comme étant plus irradiantes que les interventions chez les adultes, notamment à cause de l'utilisation d'une installation de radioscopie biplan et de la proximité de l'opérateur vis-à-vis de la source, la moyenne d'âge des patients étant de 3 ans pour cette étude (*i.e.* le patient). Cependant, la procédure étudiée requerrait une durée d'irradiation relativement faible, s'expliquant par le fait qu'elle est réalisée fréquemment dans cet établissement hospitalier et que les patients ne présentent pas, en règle générale, de comorbidité associée.

Pour une procédure pédiatrique fréquente, l'opérateur reçoit 38μ Sv à son œil situé du côté tube, ce qui correspond aux résultats délivrés dans l'étude ORAMED, réalisée chez des patients adultes (40μ Sv pour des procédures de type angiographie cérébrale).

Le PDS de chaque intervention a été relevé durant la récolte de données. Une comparaison entre le PDS moyen des interventions pédiatriques avec les valeurs publiées dans le rapport ORAMED montre que la dose au cristallin côté tube est similaire alors que le PDS des interventions pédiatriques est 5 fois plus faible. En effet, pour les angiographies cérébrales, le PDS moyen mesuré durant l'étude ORAMED est de 126 Gy cm^2 (Vanhavere *et al.*, 2012) alors que, dans cette étude, le PDS moyen de l'ensemble des interventions pédiatriques d'une année s'élève à 29 Gy cm^2 par procédure.

4.1.2 Différence entre les deux yeux

Dans cette situation, qui est similaire à ce qui peut se retrouver dans la littérature, les tubes RX se trouvent sur la gauche de l'opérateur. Une différence importante est constatée entre la dose mesurée à l'œil côté tube (œil gauche) par rapport à l'autre œil.

Tableau 4. Atténuation des lunettes plombées en fonction de l'orientation de l'opérateur et du tube utilisé.
Attenuation of the leaded glasses as a function of the operator's orientation and the tube used.

| Atténuation en fonction de l'orientation de la tête de l'opérateur | | | | | |
|--|-------------|-------------|-----|----------------|-----|
| Tube utilisé | Lunettes n° | Moyenne [%] | | Écart type [%] | |
| | | 90° | 45° | 90° | 45° |
| Frontal | 1 | 85 | 118 | 0,8 | 0,4 |
| | 2 | 4,0 | 107 | 29 | 0,6 |
| | 3 | 398 | 237 | 0,2 | 19 |
| | 4 | 536 | 284 | 0,7 | 12 |
| Latéral | 1 | 434 | 618 | 0,1 | 0,2 |
| | 2 | 319 | 521 | 0,5 | 0,1 |
| | 3 | 69,0 | 669 | 0,1 | 0,3 |
| | 4 | 749 | 674 | 0,1 | 0,1 |
| Biplan | 1 | 235 | 346 | 0,2 | 0,6 |
| | 2 | 139 | 234 | 0,9 | 0,3 |
| | 3 | 522 | 448 | 0,5 | 0,5 |
| | 4 | 631 | 436 | 0,1 | 0,6 |

Selon Chong *et al.* (2000), la raison d'une telle différence réside dans l'orientation de la tête de l'opérateur selon la disposition des écrans de visualisations.

Il est intéressant de noter que la différence entre les deux yeux mériterait d'être prise en compte dans l'estimation de la dose reçue par le cristallin. Il serait alors conservatif de considérer prioritairement l'œil côté tube.

4.1.3 Facteurs d'exposition Hp(0,07)/PDS

Le calcul des facteurs d'exposition (rapport entre Hp(0,07) mesurée au niveau du cristallin [μSv] et le PDS de l'intervention [Gy cm^2], Schueler *et al.*, 2006) met également en évidence une différence entre l'œil côté tube (gauche) et l'œil opposé, qui est due à la différence de dose mesurée au niveau des deux yeux. Le facteur pour l'œil gauche s'élève à $1,2 \mu\text{Sv}/(\text{Gy cm}^2)$ contre $0,7 \mu\text{Sv}/(\text{Gy cm}^2)$ pour l'œil droit. Rappelons que ces facteurs d'exposition sont représentatifs d'une situation dans laquelle l'opérateur ne porte pas de lunettes plombées mais utilise un écran de protection latéral. En multipliant ces facteurs d'exposition par le PDS moyen de 29 Gy cm^2 par intervention pour les 104 interventions pédiatriques en 2014, nous obtenons respectivement $3,6$ et $1,8 \text{ mSv an}^{-1}$ pour l'œil gauche et droite, donc à peu près les mêmes résultats qu'à la Section 4.1.1.

Ces résultats sont corroborés par ceux utilisés par l'IAEA. En effet, cette dernière préconise un facteur de conversion de $1 \mu\text{Sv}/(\text{Gy cm}^2)$ dans une situation similaire à cette étude (avec écran latéral et sans lunettes plombées). Sans moyen de protection, l'IAEA préconise un facteur de $10 \mu\text{Sv}/(\text{Gy cm}^2)$, ce qui démontre l'importance de l'utilisation de l'ensemble des moyens de protection.

4.2 Efficacité des lunettes plombées

Après avoir mesuré la dose au cristallin durant les interventions, il est intéressant de se pencher sur l'efficacité des lunettes plombées. L'étude ORAMED souligne que seuls 31 %

des opérateurs en radiologie interventionnelle portent systématiquement des lunettes de protection. De ce fait, il est important de pouvoir quantifier leur efficacité. Un équivalent de dose au cristallin de 4 mSv an^{-1} est certes faible, mais elle ne résulte que des examens pédiatriques, qui représentent seulement une faible proportion de l'activité habituelle d'un clinicien.

Dans les chapitres précédents, une variabilité de dose relativement importante est constatée entre les deux yeux. Notons ici que, pour l'évaluation de l'efficacité des lunettes plombées, le détecteur a été placé sur l'œil du fantôme anthropomorphe côté tube. Les conclusions développées dans les chapitres suivants sont donc conservatives et valables uniquement pour l'œil côté tube. Il est toutefois probable que l'efficacité des lunettes plombées ne sera pas identique entre l'œil côté tube et l'œil opposé. Afin de diminuer le temps d'exposition nécessaire pour les mesures, l'écran de protection latéral n'a pas été utilisé.

4.2.1 Contribution de l'épaisseur d'équivalent de plomb

Afin d'évaluer la contribution de l'épaisseur d'équivalent de plomb, la comparaison de l'efficacité a été effectuée avec les lunettes n° 2, modèle sport possédant $0,75 \text{ mmEqPb}$ et n° 3, modèle classique possédant $0,5 \text{ mmEqPb}$. Les résultats démontrent que la paire de lunettes n° 3 (modèle classique) est plus efficace que la n° 2 (modèle sport), alors qu'elle possède une plus faible épaisseur d'équivalent de plomb. En effet, pour le tube frontal, la paire n° 3 atténue le rayonnement incident de $39,8 \pm 2 \%$ (tête à 90°) contre $4,0 \pm 2,9 \%$. Pour le tube latéral et les deux tubes en simultané, c'est respectivement $69,0 \pm 0,1 \%$ (contre $31,9 \pm 0,5 \%$ pour la paire n° 2) et $52,2 \pm 0,5 \%$ (contre $13,9 \pm 0,9 \%$) de réduction en dose. La tendance est similaire, quoique moins marquée, pour la tête orientée à 45° . Ceci confirme l'hypothèse stipulant que l'épaisseur d'équivalent de plomb n'est pas considérée comme un bon indicateur en vue de déterminer l'efficacité d'un modèle de lunettes plombées (Figure 3).

Dès lors, il s'avérerait intéressant de savoir si augmenter l'épaisseur d'équivalent de plomb dans un même modèle de lunettes augmenterait leur efficacité. Pour ce faire, une comparaison a été faite avec les lunettes n° 3 et 4, toutes deux

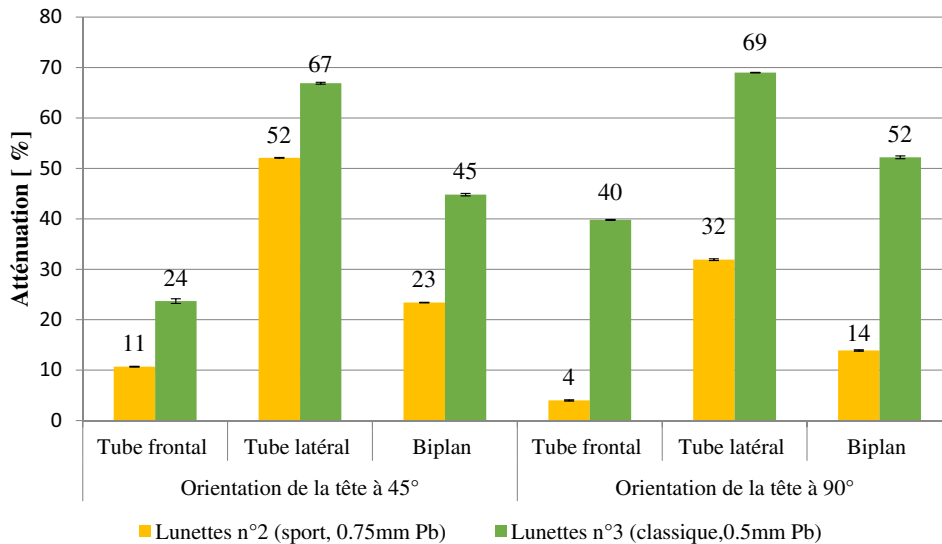


Figure 3. Influence de la différence des épaisseurs d'équivalent de plomb.
Influence of the different lead equivalent thicknesses.

du modèle classique mais possédant respectivement 0,5 et 0,75 mmEqPb. Les résultats démontrent que les lunettes possédant 0,75 mmEqPb protègent davantage le cristallin lorsque la tête de l'opérateur est positionnée à 90°, orientation prépondérante pour les interventions pédiatriques, notamment à cause de la proximité de l'opérateur avec le patient. En effet, pour les tubes frontal, latéral et pour les deux tubes combinés, la protection offerte par la paire n° 4 est de respectivement $53,6 \pm 0,7 \%$ (contre $39,8 \pm 0,2 \%$ pour la paire n° 3), $74,9 \pm 0,1 \%$ (contre $69,0 \pm 0,1 \%$) et $63,1 \pm 0,1 \%$ (contre $52,2 \pm 0,5 \%$). À 45°, l'épaisseur d'équivalent de plomb n'a par contre pas d'influence majeure sur l'efficacité des lunettes.

4.2.2 Contribution de la protection latérale

Les deux paires de lunettes du modèle sport (lunettes n° 1 et 2) ont été testées, mais une seule possédait une protection latérale (lunettes n° 1). La contribution de cette dernière est clairement démontrée. En effet, la protection offerte pour la tête à 90° et les tube frontal, latéral et les deux tubes combinées, est de respectivement $8,5 \pm 0,5 \%$ pour la paire n° 1 (contre $4,0 \pm 2,9 \%$ pour la paire n° 2), $43,4 \pm 0,1 \%$ (contre $31,9 \pm 0,5 \%$) et $23,5 \pm 0,2 \%$ (contre $13,9 \pm 0,9 \%$). Lorsque le tube frontal est utilisé, la différence d'efficacité est plus marquée à 90° qu'à 45°. La lunette munie d'une protection latérale est ainsi plus efficace dans toutes les situations. Ces résultats démontrent que l'ajout d'une protection latérale sur la monture est bénéfique. En effet, le gain d'atténuation peut aller jusqu'à 13 % pour le modèle possédant une protection latérale.

4.2.3 Contribution de la surface couverte

Formellement, c'est davantage l'angle solide couvert entre le centre du cristallin et les bords du verre qui joue un grand rôle dans la radioprotection. Nous ferons cependant l'hypothèse que la distance entre les verres et le cristallin est identique entre les différents modèles. C'est donc la surface du

verre qui sera déterminante pour la suite de l'évaluation. Les deux modèles qui ont été testés présentent une légère différence au niveau de la surface maximale du verre. En effet, le modèle sport possède des verres de 18 cm^2 alors que ceux du modèle classique sont de 21 cm^2 . Notons tout de même que ces valeurs sont approximatives les verres ayant été considérés comme rectangulaires pour simplifier l'estimation de leur surface. Par conséquent, le modèle « classique » (lunettes n° 3 et 4) couvre d'avantage l'œil que le modèle « sport » (lunettes n° 1 et 2). L'importance de la surface couverte est bien démontrée. Les lunettes les plus couvrantes sont plus efficaces dans toutes les situations. La Figure 4 compare le modèle sans protection latérale avec le modèle plus couvrant possédant la même épaisseur d'équivalent de plomb. Il est possible de constater que la différence d'efficacité est beaucoup plus marquée à 90° (54% contre 4% , 75% contre 32% et 63% contre 14% de réduction de dose pour les tubes frontal, latéral et la combinaison des deux tubes) qu'à 45° (28% contre 11% , 67% contre 52% et 44% contre 23% pour ces mêmes tubes). Ceci est probablement dû au fait qu'à 90°, l'irradiation du cristallin par la partie latérale de l'œil est majorée, le plan d'incidence des rayons X diffusés étant quasiment tangent au verre principal. Il est donc extrêmement important d'opter pour une paire de lunettes minimisant au maximum l'espace « libre » entre l'opérateur et la lunette, et particulièrement lorsque ce dernier est amené à détourner la tête (tête à 90°).

Sturchio *et al.* (2013) ont eux aussi comparé un modèle « sport » avec un modèle « classique » plus couvrant, et démontrent également qu'une paire de lunettes plus couvrante possède une meilleure efficacité. Ceci permet non seulement de soutenir l'hypothèse de cette étude, mais aussi de penser que ces résultats sont transposables à des modèles différents de ceux que testé dans cette étude (Sturchio *et al.*, 2013).

5 Conclusion

La radiologie interventionnelle pédiatrique est un domaine particulièrement irradiant pour l'opérateur, avec un ratio dose

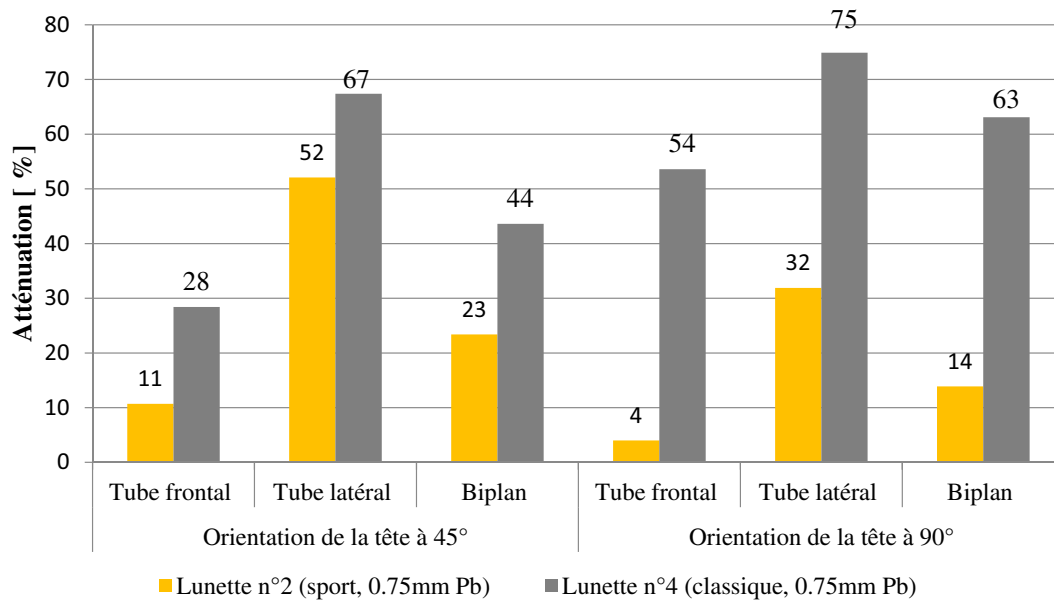


Figure 4. Influence de la surface couverte.
Influence of the covered area.

au cristallin / PDS 5 fois plus élevé que lors d'interventions réalisées chez des patients adultes (McVey *et al.*, 2013). Bien que la pédiatrie représente généralement une faible partie de la charge de travail globale des neuroradiologues interventionnistes, cette dernière nécessite néanmoins d'être prise sérieusement en compte, compte tenu de son caractère particulièrement irradiant.

Un moyen efficace pour réduire la dose au cristallin réside dans l'utilisation adéquate de moyens de radioprotection. Parmi ceux-ci, les lunettes plombées permettent d'atténuer jusqu'à 75 % de la dose au cristallin. Il a été mis en évidence que l'efficacité de ces dernières était grandement tributaire de certains paramètres, le plus important étant la surface couvrante, dont l'effet est plus marqué que la simple équivalence d'épaisseur de plomb dans le verre à géométrie égale. De plus, l'ajout d'une protection latérale sur la monture des lunettes est bénéfique pour réduire l'irradiation du cristallin en augmentant simultanément la surface couvrante ainsi qu'en réduisant le rayonnement avec un grand angle d'incidence.

Le positionnement des écrans de visualisation joue également un rôle important dans la protection du cristallin. En effet, l'angle entre la tête de l'opérateur et la source de rayonnement diffusé influence grandement la dose au cristallin, principalement celle de l'œil côté tube.

Références

- Chong N., Yin W., Chan P., Cheng M., Ko H., Jeng S., Lee J. (2000) Evaluation of Absorbed Radiation Dose to Working Staff During Cardiac Catheterization Procedures, *Chinese Medical Journal* **63**, 816-821.
- IAEA (2013) Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, TECDOC No. 1731.
- McVey S., Sandison A., Sutton D.G. (2013) An assessment of lead eyewear in interventional radiology, *J. Radiol. Prot.* **33**, 647.
- Schueler B.A., Vrieze T.J., Bjarnason H., Stanson A.W. (2006) An investigation of operator exposure in interventional radiology, *Radiographics* **26**, 1533-1541.
- Sturchio G., Newcomb R., Molella R., Varkey P., Hagen P., Schueler B. (2013) Protective Eyewear Selection for Interventional Fluoroscopy, *The Radiation Safety Journal* **104**, 11-16.
- Vanhavere F., Carinou E., Gualdrini G., Clairand I., Sans Merce M., Ginjaume M., Nikodemova D., Jankowski J., Bordy J-M., Rimpler A., Wach S., Martin P., Struelens L., Krim S., Koukorava C., Ferrari P., Mariotti F., Fantuzzi E., Donadille L., Itié C., Ruiz N., Carnicer A., Fulop M., Domienik J., Brodecki M., Daures J., Barth I., Bilski P. (2012). ORAMED : Optimization of Radiation Protection of Medical Staf, EURADOS Report 2012-02.
- Vaño E., Ubeda C., Leyton F., Miranda P., Gonzalez L. (2009). Staff Radiation Doses in Interventional Cardiology : Correlation With Patient Exposure, *Pediatr. Cardiol.* **30**, 409-413.