

Cristallin et rayonnements ionisants

AUTEUR :

A. Bourdieu, département Études et assistance médicales, INRS

EN
RÉSUMÉ

Suite à la transposition de la directive EURATOM 2013/59 dans le Code du travail, la valeur limite d'exposition (VLE) professionnelle aux rayonnements ionisants est abaissée à 20 millisieverts sur 12 mois consécutifs pour le cristallin. Les situations de travail étant très variées, les effets de cette diminution de VLE sont surtout attendus dans le secteur médical (spécialités interventionnelles). Différentes méthodes d'évaluation de la dose au cristallin sont présentées. Doit être privilégié l'emploi de dosimètres passifs (par exemple thermoluminescents) positionnés au plus près de l'œil, du côté le plus exposé et sous les lunettes plombées le cas échéant. Les mesures de radioprotection, le suivi en santé au travail ainsi que la conduite à tenir en cas d'accident font l'objet d'un développement particulier.

MOTS CLÉS

Rayonnement ionisant / Radioprotection / Dosimétrie / Surveillance médicale / Règlementation / Valeur limite / Œil / Conduite à tenir / Suivi médical

1. L'expression mSv/an sera employée au sens de mSv sur 12 mois consécutifs.

La directive EURATOM 2013/59, basée sur l'avis de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) du 21 avril 2011, a été transposée pour partie aux articles R.4451-1 et suivants du Code du travail (CT) par le décret n° 2018-437 du 4 juin 2018. Elle a instauré de nouvelles valeurs limites d'exposition (VLE) professionnelle au cristallin pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants (RI). L'article R.4451-6 du CT fixe ainsi cette VLE à 20 millisieverts (mSv) sur 12 mois consécutifs¹ à compter du 1^{er} juillet 2023. Du 1^{er} juillet 2018 au 30 juin 2023, la valeur limite cumulée pour le cristallin est fixée à 100 mSv, pour autant que la dose reçue au cours d'une année ne dépasse pas 50 mSv. L'article R.4451-8 fixe à 15 mSv/an la VLE au cristallin pour les jeunes travailleurs âgés de 15 à 18 ans. Pour le public, la valeur limite de 15 mSv/an est maintenue.

DONNÉES ÉPIDÉMIOL- OGIQUES ET ANATOMO- PATHOLOGIQUES

Diverses données épidémiologiques ont conduit à abaisser la VLE au cristallin, notamment l'augmenta-

tion de la fréquence des cataractes chez les survivants d'Hiroshima-Nagasaki, chez certains patients après traitement par RI et chez les « liquidateurs » de Tchernobyl [1]. En contexte professionnel, des cas agrégés de cataractes ou d'opacités cristalliniennes, considérées comme leurs stades précurseurs [2], ont été mis en évidence, notamment chez les personnels soignants. Certaines caractéristiques anatomiques et physiopathologiques ont fourni d'autres éléments pour un abaissement de la VLE.

En préambule, il faut rappeler certaines particularités du cristallin : non vascularisé, il poursuit sa croissance tout au long de l'existence et ne peut évacuer ni cellules ni déchets. Ses cellules se différencient en perdant noyau et organites intracellulaires, garantissant ainsi sa transparence et sa réfringence. Trois types de cataracte sont distingués : nucléaire, corticale et sous capsulaire postérieure (CSP) [3]. Cette dernière localisation permet d'évoquer un lien avec une exposition à des RI, sans caractère pathognomonique toutefois. Les CSP répondraient en effet à une physiopathologie particulière : les RI entraîneraient des effets directs et médiés par le stress oxydatif sur

les cellules épithéliales de la zone germinative du cristallin. S'en suivraient des lésions de l'ADN, des altérations de conformation des protéines et des lipides, une prolifération, des anomalies de la migration et de la différenciation des cellules [3].

À la lumière de ces données épidémiologiques et anatomopathologiques, et de leur confrontation aux reconstitutions des niveaux d'exposition, la cataracte est considérée comme un effet déterministe des RI, c'est-à-dire dépendant de la dose cumulée et sans lien avec le débit de dose [4]. Une valeur de dose cumulée de 0,5 Gray (Gy) sur la vie entière a été proposée.

SECTEURS D'ACTIVITÉ ET NIVEAUX D'EXPOSITION RAPPORTÉS DANS LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

Le domaine d'activité conditionne pour partie les modalités d'exposition aux RI. Ainsi, il est coutume de distinguer divers secteurs : médical et dentaire, vétérinaire, recherche, industrie et nucléaire, aéronautique et engins spatiaux, défense (qui ne sera pas abordé ici).

SECTEUR DE LA SANTÉ

La comparaison des études est mal aisée [5] et peut même conduire à des conclusions discordantes. En effet, les méthodologies d'évaluation de la dose (mesures, extrapolations, simulations...) sont très diverses, de même que le type de gestes médico-chirurgicaux, les radionucléides (RN) et activités manipulées, les pratiques de radioprotection (RP) mises en œuvre au poste de travail... sans oublier la variabilité des critères diagnostiques employés pour établir la pathologie. De plus, le niveau d'exposition

peut varier du simple au double selon l'opérateur pour une même dose au patient [6]. Dans un secteur en perpétuel développement, la complexification des actes peut gommer les effets des progrès techniques et de la RP en aboutissant à des durées d'exposition aux rayons X (RX) de l'ordre de l'heure. Le secteur médical, plus particulièrement les spécialités interventionnelles, sera le domaine le plus impacté par l'abaissement de la VLE [7]. En parallèle, la publication 139 de la CIPR, dite « CIPR 139 » [8] souligne que la grande variété des niveaux d'exposition témoigne du potentiel d'amélioration des pratiques de RP. Pour le cas de techniques en cours de développement et du secteur de la recherche, faute de littérature scientifique fournie, est préconisée la réalisation d'études de poste, surtout s'il existe des indices d'un risque particulier sur le cristallin (voir le paragraphe « Démarche d'évaluation dosimétrique »).

SPÉCIALITÉS INTERVENTIONNELLES

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) définit les spécialités interventionnelles comme « l'ensemble des actes médicaux invasifs, diagnostiques ou thérapeutiques ainsi que les actes chirurgicaux utilisant des RI à visée de guidage per-procédure, y compris le contrôle » [9]. Sont ainsi employés :

- la radiographie (graphie) : image unique, voire séquences d'images rapprochées sur un temps très court ; elle délivre de 130 à 500 nanogray par image ;
- la radioscopie (scopie, également dite fluoroscopie) : permet la réalisation de vidéos dont la longueur peut être importante ; la dose par pulse est évaluée de 30 à 65 nanogray ;
- de façon plus marginale, le scanner (ou scanographie ou tomodesitométrie).

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) met en avant trois notions :

- la RP est mieux prise en compte dans les installations fixes et dédiées (cardiologie, neuroradiologie, imagerie vasculaire...) que dans les blocs opératoires où sont employés des appareils mobiles et où le personnel est moins formé à l'utilisation des générateurs de RX ;
- la conception des blocs n'intègre pas en amont les équipements de protection collective (EPC) ;
- le personnel, en particulier les praticiens libéraux, est insuffisamment formé, il manque des personnes ressources (physiciens médicaux pour l'optimisation du matériel...) et des moyens.

De façon générale, la littérature scientifique retient que l'opérateur lui-même est la personne la plus exposée parmi l'ensemble des corps de métier présents en salle interventionnelle ou au bloc opératoire.

Cardiologie interventionnelle

La cardiologie interventionnelle est l'un des domaines du soin le plus fréquemment évalué en raison de sa relative ancienneté et de son grand développement [4, 10]. Ont été repérés à risque particulier pour l'exposition du cristallin : la pose de défibrillateurs, les actes de resynchronisation cardiaque, l'ablation par radiofréquences de fibrillation auriculaire, le traitement d'occlusion coronaire totale chronique, les angioplasties, et, de façon générale, toute la radiologie vasculaire (endoprothèses aortiques, embolisations artérielles...).

D'après l'étude O'CLOC (*Occupational cataracts and lens opacities in interventional cardiology*) [4, 11], en l'absence de radioprotection des yeux, la dose moyenne au cristallin par procédure varie de 46 microsieverts (μSv) (coronarographie) à 236 μSv (resynchronisation cardiaque). Les études pointent l'asy-

métrie des doses reçues, généralement au dépend de l'œil gauche, plus proche du tube générateur de RX.

Chez les cardiologues interventionnels de l'étude O'CLOC [4, 10], le risque relatif (RR) d'opacités cristalliniennes sous-corticales postérieures est évalué à 3,85 (IC 95 % [1,3-11]), alors qu'aucun lien entre exposition aux RI et opacités nucléaires ou corticales n'est apparu. Ces résultats sont concordants avec une revue de la littérature [12] qui conclut à un RR significatif supérieur à 3 pour les opacités de siège postérieur mais sans majoration du risque pour les localisations nucléaires ou corticales. De plus, alors que la VLE au cristallin précédente (150 mSv/an) était dépassée par 1 % des cardiologues interventionnels, il apparaît qu'environ 60 % d'entre eux pourraient excéder la VLE de 20 mSv/an.

Autres disciplines interventionnelles

Sans prétendre à un caractère exhaustif, la littérature [5, 13, 14] retient comme gestes à risque particulier, en termes d'exposition du cristallin, les procédures suivantes :

- digestives : drainage biliaire, chimio-embolisation, cholangiopancréatographie rétrograde ;
- orthopédiques : vertébroplastie, kyphoplastie², infiltration ;
- neurologiques : embolisation de malformation artério-veineuse ;
- gynécologiques : hystérosalpingographie ;
- ...

D'après les données du projet ORAMED, les embolisations génèrent les expositions les plus importantes, avec une dose moyenne par procédure de 60 μ Sv [15]. D'après le programme européen EURADOS [7], 50 % des valeurs maximales d'exposition du cristallin sont supérieures

à 15 mSv/an, et 35 % à 20 mSv/an, dans les spécialités interventionnelles.

Scanner interventionnel (Computed tomography)

L'intérêt de cette technique réside dans la possibilité de réaliser des biopsies et/ou des ponctions d'organes en mouvement. L'opérateur peut donc être amené à réaliser un acte pendant l'acquisition d'images, alors même que l'émission de RX est plus importante qu'en scopie ou graphie. À titre illustratif, les doses ont été évaluées de 7 à 48 μ Sv par procédure de type biopsie [5]. L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) conseille de réaliser des mesures aux extrémités et au niveau des yeux [16].

MÉDECINE NUCLÉAIRE

Tous les RN utilisés en médecine nucléaire (MN) ou dans le domaine de la recherche ne présentent pas un risque pour le cristallin. L'attention doit se porter sur l'yttrium 90, l'iode 131, le gallium 68, le fluor 18 et le technétium 99m [17]. Ont été repérés comme situations à risque, la préparation de médicaments radiopharmaceutiques [18], l'injection de fluor 18 et le contrôle qualité des cyclotrons pour la tomographie par émission de positons (TEP) [19]. Le programme EURADOS [7] a évalué que 81 % des doses maximales au cristallin sont comprises entre 1 et 5 mSv/an dans ces activités. Néanmoins, une synthèse de diverses études consacrées à la MN [5] note que la dose de 20 mSv au cristallin peut être dépassée. La réalisation d'études de poste est donc recommandée. Il faut en outre insister sur le caractère accidentogène du travail avec des sources non scellées (voir le paragraphe « Conduite à tenir en cas d'accident »).

CURIETHÉRAPIE

Bien qu'elle ait été repérée comme pratique à risque pour le cristallin par l'Association internationale de radioprotection (IRPA) [18], la curiethérapie n'a pas fait l'objet d'une littérature fournie. Elle recouvre des actes variables en termes d'exposition au risque. Une étude [5] a évalué à moins de 17 μ Sv la dose reçue au niveau du front (du même ordre que la dose au corps entier) lors d'implantation d'iode 125 et ne retient donc pas d'indication d'EPI, sauf pour la phase de contrôle radiologique. De même, l'IRSN ne conclut pas à une indication de protection *a priori* pour les techniques de curiethérapie employant l'iridium 192 à débit pulsé ou haut débit, ou des grains d'iode 125, mais une confirmation par étude de poste est néanmoins nécessaire [5].

MÉDECINE VÉTÉRINAIRE

Certaines particularités méritent d'être soulignées dans le secteur vétérinaire, notamment en pratique équine : emploi de RX de fortes puissances, faisceau orienté horizontalement, nécessité de présence à proximité de l'animal, voire de contention, pratique hors cabinet vétérinaire, donc sans EPC intégrés à la conception des locaux. La littérature scientifique pointe des lacunes majeures en termes de radioprotection et une publication évoque un risque de dépassement de la VLE au cristallin [20].

INDUSTRIE NUCLÉAIRE DE BASE

Ont été recensées, comme situations à risque particulier d'exposition du cristallin [5, 18], le travail en boîte à gants, les interventions sur générateurs de vapeur, les opérations de démantèlement, de contrôle et de maintenance, la décontamination ou le travail à proximité de grandes surfaces contami-

2. La kyphoplastie vise à restaurer la hauteur de vertèbres fracturées, par exemple par insertion, expansion, retrait d'un ballonnet dans un corps vertébral, puis injection de ciment dans l'espace ainsi créé.

Cristallin et rayonnements ionisants

nées, les processus de chargement ou déchargement de combustible... Selon les résultats d'une simulation numérique, 13 minutes de présence au niveau d'un générateur de vapeur suffisent pour atteindre 20 mSv au cristallin [21]. Une étude en deux volets (estimation en situation statique sur des fantômes placés à 10-15 cm des boîtes à gants, et en dynamique sur des travailleurs pendant une étude de poste) a également conclu que la dose au cristallin due aux neutrons, émissions β et γ , peut dépasser 20 mSv par an [22]. Enfin, une étude menée sur les travailleurs du complexe nucléaire de Mayak en Russie a conclu à une augmentation significative et linéaire du risque de cataracte avec l'accroissement de la dose cumulée. Toutefois, il faut souligner les difficultés méthodologiques multiples de cette publication [23].

RADIOGRAPHIE INDUSTRIELLE

Le suivi, sur 12 ans, de 1 400 radiologues industriels chinois a mis en évidence un RR de cataracte corticale et/ou sous capsulaire postérieure de 3 environ. Ce risque diminue avec la présence d'EPC et le port d'EPI, sans toutefois qu'un lien avec la dose ait été établi [24]. Hormis cette étude, non exempte de biais méthodologiques, peu de données sont disponibles. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) ne conclut pas à un risque pour le cristallin hors contexte accidentel (« blocage de source »). L'IRSN recommande néanmoins d'appliquer la démarche de repérage d'exposition à risque particulier dans tout le secteur industriel [5].

SECTEUR AÉRONAUTIQUE ET SPATIAL

Les données issues de la *National Aeronautics and Space Administra-*

tion (NASA) sont en faveur d'une augmentation du RR d'atteinte du cristallin chez les spationautes [25]. La nature particulière de leur exposition (neutrons, ions lourds...) semble pouvoir rendre compte de la localisation nucléaire des cataractes rencontrées dans cette population [26]. La caractérisation de l'exposition des spationautes est abordée par la publication 123 de la CIPR [27]. L'article R.4451-95 du CT dispose d'une valeur limite au cristallin dérogatoire de 500 mSv sur la durée du vol.

Une étude de 2005 [28] a porté sur les pilotes de lignes commerciales. Elle a évalué à 3 leur RR de cataracte nucléaire, là encore probablement en lien avec les caractéristiques physiques des RI d'origine cosmique. L'outil SIEVERTPN, accessible en ligne³, permet d'évaluer la dose reçue à partir des paramètres du vol. Sur 12 mois, le personnel navigant reçoit en moyenne 2 mSv [29].

Au total, d'après les données du suivi de l'exposition professionnelle en France en 2016 [29], la VLE de 20 mSv a été dépassée par un professionnel du secteur médical sur les 4 431 travailleurs suivis pour la dose équivalente au cristallin. Aucune dose supérieure à 20 mSv pour le cristallin n'a été rapportée dans les autres secteurs d'activité.

DÉMARCHE D'ÉVALUATION DOSIMÉTRIQUE

La démarche générale de conduite d'une étude de poste est présentée dans un guide pratique de 2015 [16]. L'ensemble des risques présents au poste de travail doit faire l'objet d'une évaluation sous la responsabilité de l'employeur. L'évaluation individuelle de l'exposition aux RI,

préalable à l'affectation, doit tenir compte des « incidents raisonnablement prévisibles inhérents au poste de travail » (article R.4451-53 du CT). L'estimation de la dose permet *in fine* à l'employeur de classer les travailleurs après recueil de l'avis du médecin du travail. L'ensemble de cette démarche s'applique aux doses équivalentes et à la dose efficace⁴.

PRINCIPES GÉNÉRAUX D'ÉVALUATION DU TYPE D'EXPOSITION

La typologie des RI ne sera pas détaillée ici. Sur un plan opérationnel, l'exposition aux RI peut résulter de :

- RX, générés par des appareils électriques, responsables d'une irradiation externe et à distance de la source émettrice ; leur production cesse dès arrêt de l'alimentation électrique ; RX et rayons γ sont des photons ;
- radionucléides présents en sources scellées (radiographie industrielle) ou non scellées (MN, Installations nucléaires de base – INB). Il existe dans ce dernier cas un risque d'irradiation, de contamination externe (cutanée, oculaire) ou interne (inhalation, ingestion, effraction cutanée).

Bien que l'exposition aux neutrons soit jugée comme présentant un risque pour le cristallin, il est « improbable » que leur part dans la dose reçue par le cristallin soit importante, hors spationautes et situations accidentelles [18]. Les neutrons ne seront donc pas abordés en détail.

REPÉRAGE DES SITUATIONS À RISQUE PARTICULIER POUR LE CRISTALLIN

L'IRPA distingue trois configurations [18] :

- exposition relativement uniforme de l'ensemble du corps, par

4. Les doses équivalentes correspondent aux doses absorbées par les organes et tissus. La dose efficace reflète l'exposition du corps entier (somme des doses équivalentes délivrées par exposition externe et interne le cas échéant).

3. www.sievert-system.org/#Calcul

exemple dans le cas d'une source à distance ;

- exposition inhomogène à des RI faiblement pénétrants, entraînant une dose efficace faible mais une dose équivalente significative au cristallin : par exemple proximité d'une source directionnelle d'émetteurs β d'énergie supérieure à 700 kiloélectronvolt (keV) ;
- exposition à un « champ fortement inhomogène » où les yeux sont spécialement à risque d'exposition : médecins dans les spécialités interventionnelles, professionnels travaillant à proximité d'une source de RI et dont le corps, à l'exception de la tête, est protégé (tablier...).

L'IRSN [5] propose des critères pratiques de repérage d'activités à risque d'exposition significative du cristallin :

- port d'un EPI au niveau du corps, excluant la tête ;
- géométrie du poste entraînant une exposition de la tête supérieure à celle du corps (par exemple boîtes à gants) ;
- exposition localisée à des rayonnements peu pénétrants (émission β d'énergie max > 700 keV, susceptibles d'atteindre une profondeur de 3 mm, ou photons de basse énergie produits par des générateurs électriques haute tension de moins de 150 kilovolts) [30].

Il est à noter que les spécialités interventionnelles cumulent ces trois facteurs.

Plus largement, l'IRSN recommande de réaliser des études de poste dans « toutes les situations où l'exposition du cristallin n'est pas ou est mal connue /.../ et, de manière plus générale, intégrer systématiquement la dose au cristallin dans toute étude de poste ». Une surveillance dosimétrique est indiquée « dans les cas où l'exposition du cristallin évaluée lors de

l'étude de poste est susceptible de dépasser 15 mSv/an (limite pour le public) » [16].

MISE EN ŒUVRE DE L'ÉVALUATION DE LA DOSE AU CRISTALLIN

La dose équivalente au cristallin n'est pas directement mesurable. Elle est évaluée par la grandeur $H_p(3)$, soit la dose absorbée à une profondeur de 3 mm, correspondant à la position du cristallin. Les doses à la peau et au corps entier sont estimées respectivement en $H_p(0,07)$ (à 0,07 mm de profondeur) et $H_p(10)$ (à 10 mm). La synthèse des critères de repérage présentés ci-dessus conduit à la proposition d'un logigramme (figure 1) [5, 16].

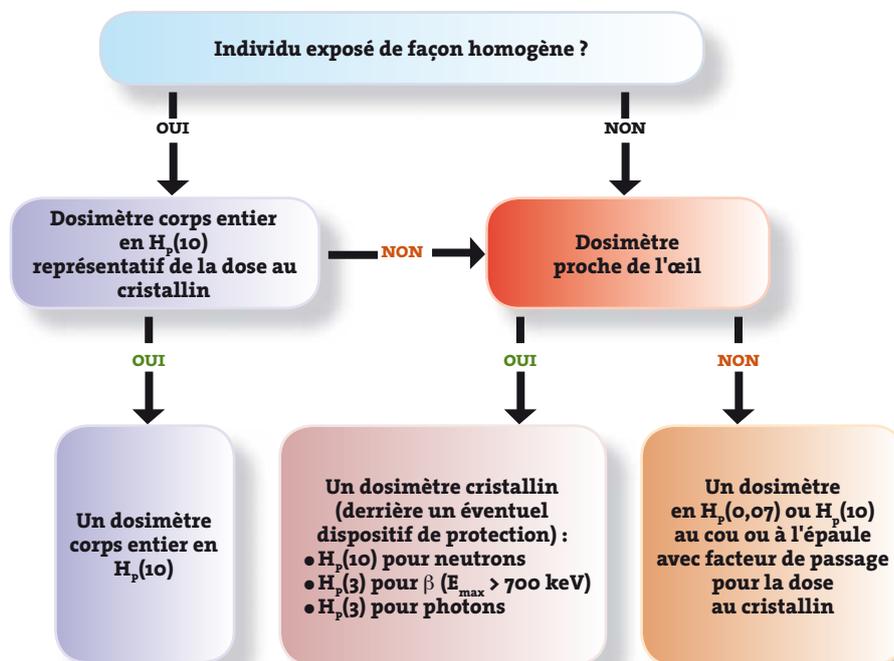
Diverses méthodes d'évaluation de la dose équivalente au cristallin sont présentées ci-dessous. L'accent sera mis sur une conduite à tenir simplifiée et fonction des informations et du matériel à disposition

du médecin du travail ou du professionnel de la radioprotection.

L'ÉVALUATION DOSIMÉTRIQUE PAR MESURE EN $H_p(3)$

Elle se fait au moyen de dosimètres passifs, par technique de thermoluminescence, photoluminescence stimulée optiquement (OSL) ou radiophotoluminescence (RPL) [16]. Les dosimètres thermoluminescents (TLD) existent sous forme de pastilles ou de bâtonnets et, recouverts de 3 mm de matériau tissu-équivalent ou par étalonnage, permettent la mesure en $H_p(3)$. Leurs spécifications techniques (seuils de détection, réponses angulaires et en énergies) sont à prendre en compte [31]. Les dosimètres doivent être situés au plus près de l'œil (branches de lunettes, serre-tête...), sans gêner l'opérateur, du côté le plus proche du tube et sous les EPI le cas échéant. De fait, il a été proposé [31] d'appli-

Figure 1 : Logigramme d'aide à la décision pour la mise en place de la dosimétrie au cristallin. Source : IRSN Guide pratique pour la réalisation des études dosimétriques de poste de travail Rapport PRP-HOM/DIR n° 2015-00009.



quer des facteurs de correction adaptés (définis par simulation...) si le dosimètre n'est pas porté à proximité de l'œil ou du côté le plus exposé ou ne se trouve pas sous les EPI.

LE CALCUL ET LA SIMULATION NUMÉRIQUE EN $H_p(3)$

La CIPR 139 [8] met en avant la nécessité de développer des technologies informatiques de détermination de la dose au cristallin sans recourir à des dosimètres. Toutefois, certains experts rapportent qu'il s'agit d'une « *modélisation critique* » (petit volume, radiosensibilité variable selon les parties, faible pénétration des rayonnements à risque) [30]. Ce type de méthode d'évaluation n'est pas utilisé en pratique courante.

L'EXTRAPOLATION À PARTIR D'AUTRES SITES DE MESURE

En cas d'exposition homogène du travailleur (source distante ou non directionnelle), il est possible de considérer que la dose au cristallin est du même ordre que celle du corps entier exprimée en $H_p(10)$ « *auquel est appliqué un facteur correctif, déterminé par des études spécifiques* » [5]. À noter que ce facteur peut être égal à 1 selon les circonstances [30].

À défaut de dosimètre à proximité de l'œil et pour des expositions à des photons, il est possible de s'appuyer sur des mesures réalisées au niveau du cou (plutôt qu'à l'épaule), exprimées en $H_p(0,07)$ (voire en $H_p(10)$ si les photons ont une énergie moyenne de plus de 40 kV et proviennent de l'avant) [8]. L'IRSN pointe l'intérêt de leur appliquer un « *facteur de passage* », également déterminé par des études spécifiques [5].

De façon pragmatique, pour évaluer la dose au cristallin, notamment dans les spécialités intervention-

nelles [5, 8, 31], la valeur donnée par un dosimètre placé au niveau du cou, sur un éventuel protège-thyroïde, peut être multipliée par un facteur de 0,75. Il faut souligner qu'il existe une grande variété de coefficients de corrélation entre divers types de mesures (en $H_p(3)$, en $H_p(0,07)$, en $H_p(10)$, dans l'air...) et également entre divers sites de mesures (œil, cou, thorax...) [17, 32, 33], qui ne seront pas exposés ici. De fait, si ce type d'approche peut être envisagé pour des reconstitutions de dose, il est à éviter pour les situations à risque ou des niveaux d'exposition jugés proches de 15 mSv/an.

À noter que l'article R.4451-24 du CT prévoit « *une signalisation adaptée lorsque la délimitation des zones surveillées et contrôlées ne permet pas de garantir le respect de la valeur limite de dose pour le cristallin* ».

MESURES DE RADIOPROTECTION

PRINCIPES GÉNÉRAUX

En application des principes généraux de prévention (article L.4121-2 du CT) et des notions de justification, optimisation, limitation en radioprotection, plusieurs leviers d'action sont possibles, relevant de la responsabilité de l'employeur (article R.4451-18 du CT) :

- choix de procédé de travail n'entraînant pas d'exposition aux RI ou une exposition moindre ;
- choix d'équipements et de moyens techniques moins émissifs ;
- conception intégrant en amont les protections biologiques et agencement des lieux et postes de travail (salles dites hybrides associant équipements de bloc opératoire et de radiologie ou cardiologie interventionnelle) ;
- organisation du travail visant à

réduire la durée et l'intensité des expositions (voir le paragraphe « *Mesures d'ordre technique et organisationnelles* ») ;

- maintenance et vérifications réglementaires, sans omettre les appareils de mesure, les dispositifs d'alarme et de protection.

MESURES D'ORDRE TECHNIQUE ET ORGANISATIONNELLES

[5, 6, 16, 33 à 35]

L'un des messages fondamentaux à délivrer au personnel soignant est que la radioprotection des patients fait partie intégrante de celle des travailleurs. Les mesures applicables aux spécialités interventionnelles seront abordées plus en détail.

Pour assurer la radioprotection des professionnels de santé effectuant des actes de cardiologie ou radiologie interventionnelle, peuvent être proposés de :

- régler les paramètres d'émission des RX en fonction du patient, notamment de sa corpulence ;
- utiliser des filtrations additionnelles afin de diminuer le rayonnement diffusé provenant du patient et de la table d'examen ou opératoire ;
- collimater le faisceau de RX ;
- positionner le tube générateur de RX sous la table (en n'omettant pas la protection des membres inférieurs par des bas-volets) ;
- placer le détecteur au plus près du patient ;
- limiter le temps d'émission de RX (et les activités des RN en MN) ;
- préférer la scopie à la graphie (qui peut délivrer une dose 30 fois supérieure) ;
- préférer la scopie pulsée à la scopie continue et le mode « scopie basse dose » ;
- diminuer la cadence d'images en scopie (nombre d'impulsions) et le nombre d'images radiographiques ;

- limiter les séquences d'angiographie de soustraction digitale (séries de scopies à haut débit de dose) ;
- se placer préférentiellement du côté du détecteur si le tube est positionné de profil ;
- réfléchir à l'emplacement des écrans de visualisation qui conditionne, pour partie, la position de la tête de l'opérateur, et donc l'exposition au diffusé atteignant l'opérateur par en-dessous et l'exposition au rayonnement de fuite provenant du tube [36].

Peuvent s'appliquer au secteur médical et à d'autres domaines d'activité (industriel...) :

- s'éloigner le plus possible de la source de RI (pincés en MN, recul par rapport à la table d'examen lors de l'émission de RX...), utiliser une commande déportée, une télécommande, au mieux sortir ou se placer au niveau de la console ;
- automatiser les procédés (injection de produit de contraste iodé, préparation et administration de RN...) [37] ;
- s'entraîner aux gestes et à l'utilisation des moyens de RP ;
- ...

Enfin, certains éléments doivent attirer l'attention du médecin du travail et du conseiller en radioprotection⁵, même s'ils sont peu propices à l'implémentation de mesures de RP : la voie d'abord (accès radial plus exposant que le fémoral) [38], l'orientation du tube générateur de RX (les incidences antéro-postérieure et oblique antérieure gauche de 90° sont réputées plus à risque pour le niveau d'exposition [39]).

ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION COLLECTIVE

Conformément aux principes généraux de prévention, les EPC sont à privilégier aux EPI. Pour les spé-

cialités interventionnelles, il peut s'agir de :

- paravents plombés mobiles, notamment à l'attention des infirmiers, anesthésistes... ;
- écrans plafonniers (ou écrans suspendus ou suspensions plafonniers) plombés :
 - le plus souvent d'épaisseur équivalente en plomb de 0,5 mm ;
 - placés au plus près du patient (d'où l'intérêt de bandes souples plombées appendues ou d'un décroché pour s'adapter aux contours de celui-ci). En effet, le facteur d'atténuation (de 2 à 7 selon la plupart des auteurs) dépend de leur bon positionnement [37]. Le personnel doit donc être attentif à repositionner l'écran plafonnier au fur et à mesure des déplacements des travailleurs et des repositionnements des patients ;
 - en cas d'utilisation d'un système biplan (à deux tubes), un écran plafonnier supplémentaire est recommandé [5, 37] ;
- des draps chirurgicaux plombés existent et peuvent assurer une réduction de l'exposition du cristallin d'un facteur 25 [31], mais dans l'éventualité où ils seraient positionnés dans le faisceau primaire, ils peuvent augmenter l'exposition du patient et du travailleur par ajustement automatique des paramètres d'émission des RX.

Dans les secteurs de l'industrie, de la recherche, médical..., peuvent se rencontrer :

- boîtes à gants ;
- protège-flacons, protège-seringues ;
- châteaux plombés ;
- ...

ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE

Dans le cadre de la RP du cristallin, il s'agit essentiellement des lunettes et visières. Il faut souli-

gner que moins d'un cardiologue interventionnel sur deux en porte [7, 10, 37].

Concernant les lunettes plombées dans les spécialités interventionnelles, plusieurs éléments sont à prendre en compte :

- les matériaux : d'épaisseur équivalente en plomb de 0,5 ou 0,75 mm ;
- la conception des lunettes : la taille des verres doit permettre de protéger l'ensemble de l'œil. Un *design* enveloppant et l'ajustement des lunettes au visage diminuent le rayonnement diffusé qui atteint le cristallin à partir de l'espace situé entre les verres et le visage [8]. Au mieux, des protections latérales, possiblement d'épaisseur équivalente en plomb de 0,25 mm, complètent la protection ;
- le facteur de réduction est très variable selon les auteurs, le plus souvent estimé entre 8 et 10 [31]. La variabilité de ces données reflète, notamment, l'impact de la forme des verres, de l'ajustement des lunettes et de l'angle d'exposition [18], ainsi que l'effet des caractéristiques des émissions de RI et des situations de travail [31].

Les verres correcteurs plombés sont mieux tolérés mais restent onéreux.

Les visières en acrylique d'épaisseur équivalente en plomb de 0,1 mm sont réputées diminuer la transmission de 90 % et 80 % respectivement de photons de 70 kV et 140 kV [5]. Elles permettent le port concomitant de verres correcteurs.

Pour le cas des sources non scellées, le port de lunettes anti projection en plexiglas par exemple [18] revêt un intérêt pour la manipulation d'émetteurs β comme l'yttrium 90. En revanche, l'efficacité des lunettes plombées est moindre vis-à-vis des émissions γ du technétium 99m (un matériau

5. Le conseiller en radioprotection, désigné par l'employeur, peut être un salarié (personne compétente en RP) ou une personne morale (organisme compétent en RP) (article R.4451-112 du CT). Cf. l'info à retenir dans le même numéro.

Cristallin et rayonnements ionisants

d'épaisseur équivalente en plomb de 0,5 mm conduit à une atténuation d'un facteur deux) [40].

Le système de cabine ne laissant passer que les membres supérieurs est peu répandu et proposé essentiellement pour les techniques d'ablation en électrophysiologie [5, 11].

Pour mémoire, l'article R. 4451-56 du CT stipule que les EPI sont choisis après avis du médecin du travail « *qui recommande, le cas échéant, la durée maximale pendant laquelle ils peuvent être portés de manière ininterrompue* ».

FORMATION ET INFORMATION

Les travailleurs soumis au risque RI sans être classés doivent bénéficier d'une information. Le personnel classé bénéficie d'une formation au contenu fixé à l'article R.4451-58 du CT, renouvelée au moins tous les trois ans. Afin de parvenir à une utilisation correcte des moyens de RP, il est souhaitable de mettre en place des entraînements spécifiques. Le médecin du travail est partie prenante de ces actions, tout comme le conseiller en radioprotection. Un affichage, à proximité des postes de travail doit mentionner la conduite à tenir d'urgence, les coordonnées du conseiller en radioprotection, du médecin du travail. Des supports de sensibilisation au risque existent ⁶.

6. Voir notamment le site de l'INRS

www.inrs.fr/media.

html?refINRS=A%20777.

MODALITÉS DU SUIVI DE L'ÉTAT DE SANTÉ DES TRAVAILLEURS

Les RI figurent sur la liste des risques particuliers imposant un suivi individuel renforcé (SIR) (article R. 4624-23 du CT). Un examen médical d'aptitude à l'embauche

est réalisé préalablement à l'affectation au poste exposant aux RI. Pour le personnel classé en catégorie A, un examen médical d'aptitude périodique est réalisé par un médecin du travail au moins une fois par an. Le suivi du personnel classé en catégorie B consiste, *a minima*, en visites d'aptitude réalisées par le médecin du travail tous les quatre ans, entrecoupées de visites intermédiaires, tous les deux ans au plus, effectuées par un professionnel de santé et donnant lieu à une attestation de suivi. Le médecin du travail détermine les examens complémentaires et leur fréquence. Les signes fonctionnels, le recueil des dosimétries individuelles, les résultats d'études de poste, l'existence d'expositions accidentelles peuvent, notamment, être des éléments de la décision.

La cataracte peut faire l'objet d'une déclaration en maladie professionnelle (tableau n° 6 du régime général et n° 20 du régime agricole), jusqu'à 10 ans après la fin de l'exposition. Une sensibilisation à cette pathologie peut s'intégrer au suivi post-professionnel ou post-exposition justifié par l'exposition aux RI.

CONDUITE À TENIR EN CAS D'ACCIDENT

L'urgence médico-chirurgicale prime sur le risque radiologique [41, 42].

DANS LE CADRE D'UNE IRRADIATION EXTERNE

Il n'y a pas de traitement d'urgence spécifique à mettre en œuvre concernant la cataracte. La conduite à tenir sera fonction de l'évaluation de la dose et d'éventuelles atteintes tissulaires associées (recherche de lésions déterministes...).

Le volet administratif comprend le

traçage et la déclaration de l'accident, l'analyse des causes et la mise en œuvre d'éventuelles mesures correctives.

EN CAS DE PROJECTION OCULAIRE DE PRODUITS LIQUIDES OU PULVÉRULENTS, DE REMISE EN SUSPENSION D'AÉROSOLS

La conduite à tenir comprend trois volets.

UN VOLET MÉDICAL

Celui-ci implique l'intervention du conseiller en radioprotection et comprend plusieurs étapes :

- lavage, au plus vite, de l'œil à l'eau ou au sérum physiologique (sans omettre de protéger les oreilles, la bouche et le nez) et lavage du visage (eau, savon doux, lingettes) ;
- contrôle de l'efficacité de la décontamination : comptage de l'activité au niveau de l'œil et du visage, les résultats étant tracés ;
- nouveau nettoyage si le contrôle montre une activité résiduelle ;
- si une contamination persiste après ce deuxième lavage, la dose à l'œil et à la peau doit être évaluée ;
- évaluation du risque de transfert interne *via* les voies lacrymales par la réalisation d'une radiotoxicologie urinaire des 24 heures ; la possibilité d'une contamination cutanée à distance et/ou d'une inhalation et/ou d'une ingestion associée ne doit pas être omise ;
- information du médecin du travail et détermination d'un suivi selon l'évaluation (prescription d'examen complémentaires, dosimétrie interne...);
- l'IRSN peut être sollicité pour reconstituer la dose reçue.

UN VOLET CONCERNANT LES LOCAUX

- Plusieurs actions sont à effectuer :
- confinement des RN le cas échéant ;
 - délimitation et balisage d'un

périmètre de sécurité ;

- décontamination de la pièce et des objets ;
- évacuation des déchets (dont eau de lavage, compresses...) selon la réglementation.

UN VOLET ADMINISTRATIF

Là aussi, plusieurs actions sont à effectuer :

- informer l'employeur ;
- déclarer en accident de travail le cas échéant ;
- déclarer à l'ASN sous 48 heures, le cas échéant (guide ASN n°11⁷) ;
- analyser les causes et mettre en place les mesures correctives éventuelles ;
- rappeler les consignes en cas d'urgence ou d'accident ;
- renouveler l'information aux travailleurs, sensibiliser au port des EPI.

À titre illustratif, la désadaptation accidentelle de seringues de technétium 99m lors de recherche d'adénopathies sentinelles au bloc opératoire a occasionné une exposition au niveau des yeux estimée entre 7 et 10 mSv pour une activité de 30 mégabecquerels et à 28 mSv pour 18 mégabecquerels. Cette

7. www.asn.fr/Professionnels/Les-Guides-de-l-ASN/Guide-de-l-ASN-n-11-Declaration-et-codification-des-criteres-des-evenements-significatifs-hors-installations-nucleaires-de-base-et-transport-radioactives.

difficulté dans les reconstitutions de dose et le niveau d'exposition élevé constituent des arguments supplémentaires pour l'emploi d'EPC et d'EPI [41].

CONCLUSION

Diverses données épidémiologiques et physiopathologiques ont conduit à considérer la cataracte sous corticale postérieure comme un effet déterministe des RI, dépendant de la dose cumulée au cristallin. Compte tenu de ces éléments, la réglementation fixe la valeur limite d'exposition professionnelle au cristallin à 20 mSv/an au 1^{er} juillet 2023, assortie de dispositions transitoires. Modalités et niveaux d'exposition sont variables en fonction des secteurs d'activité. L'abaissement de la VLE aura un impact important dans le domaine médical, principalement pour les spécialités interventionnelles. En effet, ces disciplines répondent aux critères de repérage des situations à risque particulier pour l'exposition au cristallin : exposition inho-

mogène (port d'un EPI au niveau du corps ou géométrie du poste de travail), présence d'émetteurs β ou de photons capables d'atteindre une profondeur de 3 mm. La méthode de choix pour l'évaluation de la dose au cristallin repose sur l'emploi de dosimètres passifs, par exemple de type TLD, situés au plus proche de l'œil et sous les lunettes ou visières plombées le cas échéant. L'extrapolation à partir d'autres mesures est difficile au regard de la grande variété des situations de travail et des multiples facteurs intervenant dans la détermination de la dose. Il est possible de s'appuyer sur une dosimétrie du corps entier si l'exposition aux RI est homogène ou, dans le cas contraire, sur des valeurs de mesures de dosimètres placés sur le cou avec affectation d'un facteur de passage. Outre les principes généraux de prévention des risques, les mesures de radioprotection comportent un volet organisationnel et technique, l'usage correct d'EPC et d'EPI adaptés, la formation et l'information. Une vigilance particulière s'impose face au risque d'accident lors de la manipulation de sources non scellées.

BIBLIOGRAPHIE

1 | LITTLE MP - A review of non-cancer effects, especially circulatory and ocular diseases. *Radiat Environ Biophys.* 2013 ; 52 (4) : 435-49.
2 | STEWART FA, AKLEYEV AV, HAUER-JENSEN M, HENDRY JH ET AL. - ICRP Publication 118. ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs. Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP.* 2012 ; 41 (1-2) : 1-322.

3 | AINSBURY EA, BARNARD S, BRIGHT S, DALKE C ET AL. - Ionizing radiation induced cataracts: Recent biological and mechanistic developments and perspectives for future research. *Mutat Res.* 2016 ; 770 (Pt B) : 238-61.
4 | SHORE RE - Radiation and cataract risk: Impact of recent epidemiologic studies on ICRP judgments. *Mutat Res.* 2016 ; 770 (Pt B) : 231-37.
5 | Recommandations sur les bonnes pratiques en

matière de radioprotection des travailleurs dans la perspective de l'abaissement de la limite réglementaire de dose équivalente pour le cristallin. Rapport PRP-HOM/2013-00010. Pôle radioprotection, environnement, déchets et crise. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), 2013 (www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_PRP-HOM-2013-0010_Recommandations-Cristallin.pdf).

6 | DURÁN A, HIAN SK, MILLER DL, LE HERON J ET AL. - Recommendations for occupational radiation protection in interventional cardiology. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2013 ; 82 (1) : 29-42.
7 | CARINO E, GINJAUME M, O'CONNOR U, KOPEC R ET AL. - Status of eye lens radiation dose monitoring in European hospitals. *J Radiol Prot.* 2014 ; 34 (4) : 729-39.



BIBLIOGRAPHIE (suite)

- 8 | LÓPEZ PO, DAUER LT, LOOSE R, MARTIN CJ ET AL. - ICRP Publication 139. Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures. *Ann ICRP*. 2018 ; 47 (2) : 1-118.
- 9 | Séminaire « Santé au travail en radiologie interventionnelle ». Programme régional santé au travail (PRST3) 2016-2020. Septembre 2017. Autorité de sûreté nucléaire (ASN), 2017 (www.asn.fr/L-ASN/L-ASN-en-region/Ile-de-France/Actualites-de-votre-region/Seminaire-Sante-au-travail-en-radiologie-interventionnelle).
- 10 | JACOB S, BOVEDA S, BAR O, BRÉZIN A ET AL. - Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int J Cardiol*. 2013 ; 167 (5) : 1843-47.
- 11 | JACOB S, DONADILLE L, MACCIA C, BAR O ET AL. - Eye lens radiation exposure to interventional cardiologists: a retrospective assessment of cumulative doses. *Radiat Prot Dosimetry*. 2013 ; 153 (3) : 282-93.
- 12 | ELMARAEZY A, EBRAHEEM MORRA M, TAREK MOHAMMED A, AL-HABAA A ET AL. - Risk of cataract among interventional cardiologists and catheterization lab staff: a systematic review and meta-analysis. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2017 ; 90 (1) : 1-9.
- 13 | KIM KP, MILLER DL, BRRINGTON DE GONZALEZ A, BALTER S ET AL. - Occupational radiation doses to operators performing fluoroscopically-guided procedures. *Health Phys*. 2012 ; 103 (1) : 80-99.
- 14 | BARNARD SG, AINSBURY EA, QUINLAN RA, BOUFFLER SD - Radiation protection of the eye lens in medical workers-basis and impact of the ICRP recommendations. *Br J Radiol*. 2016 ; 89 (1060) : 20151034.
- 15 | VANHAVERE F, CARINOU E, DOMIENIK J, DONADILLE L ET AL. - Measurements of eye lens doses in interventional radiology and cardiology: Final results of the ORAMED project. *Radiat Meas*. 2011 ; 46 (11) : 1243-47.
- 16 | Guide pratique Réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants (version 4). Rapport PRP-HOM/DIR n° 2015-00009. Pôle radioprotection, environnement, déchets et crise. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), 2015 (www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_guide_etude_poste_travail_V4-102015.pdf).
- 17 | SZERMERSKI B, BRUCHMANN I, BEHRENS R, GEWORSKI L - Dose rate constants for the quantity Hp (3) for frequently used radionuclides in nuclear medicine. *Z Med Phys*. 2016 ; 26 (4) : 304-10.
- 18 | IRPA guidance on implementation of eye dose monitoring and eye protection of workers. International radiation protection association (IRPA), 2017 (www.irpa.net/members/54696/%7B25334E5F-2E99-4D65-B3B7-CACA648AEBAB%7D/IRPA%20guidance%20on%20implementation%20of%20eye%20dose%20monitoring%20and%20eye%20protection%20of%20workers.pdf).
- 19 | WRZESIEŃ M - ¹⁸F-FDG production procedures as a source of eye lens exposure to radiation. *J Radiol Prot*. 2018 ; 38 (1) : 382-93.
- 20 | MAYER MN, KOEHNCKE NK, BELOTTA AF, CHEVELDAE IT ET AL. - Use of personal protective equipment in a radiology room at a veterinary teaching hospital. *Vet Radiol Ultrasound*. 2018 ; 59 (2) : 137-46.
- 21 | MAENG SJ, KIM J, CHO G - Evaluation of eye lens dose to workers in the steam generator at the Korean optimized power reactor 1000. *Radiat Prot Dosimetry*. 2018.
- 22 | DEVIN P, ESPAGNAN M, DE VITA A, KRAMAR R ET AL. - La dosimétrie du cristallin Congrès national de radioprotection. Bordeaux, 11-13 juin 2013. Société française de radioprotection (SFRP), 2013 (www.sfrp.asso.fr/medias/sfrp/documents/Bordeaux-S8c.pdf).
- 23 | AZIZOVA TV, BRAGIN EV, HAMADA N, BANNIKOVA MV - Risk of Cataract Incidence in a Cohort of Mayak PA Workers following Chronic Occupational Radiation Exposure. *PLoS One*. 2016 ; 11 (10) : e0164357.
- 24 | LIAN Y, XIAO J, JI X, GUAN S ET AL. - Protracted low-dose radiation exposure and cataract in a cohort of Chinese industry radiographers. *Occup Environ Med*. 2015 ; 72 (9) : 640-47.
- 25 | HAMMER GP, SCHEIDEMANN-WESP U, SAMKANGE-ZEEB F, WICKE H ET AL. - Occupational exposure to low doses of ionizing radiation and cataract development: a systematic literature review and perspectives on future studies. *Radiat Environ Biophys*. 2013 ; 52 (3) : 303-19.
- 26 | CUCINOTTA FA, MANUEL FK, JONES J, ISZARD G ET AL. - Space radiation and cataracts in astronauts. *Radiat Res*. 2001 ; 156 (5 Pt 1) : 460-66.
- 27 | DIETZE G, BARTLETT DT, COOL DA, CUCINOTTA FA ET AL. - ICRP Publication 123. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. *Ann ICRP*. 2013 ; 42 (4) : 1-339.
- 28 | RAFNSSON V, OLAFSDOTTIR E, HRAFNEKELSSON J, SASAKI H ET AL. - Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case-control study. *Arch Ophthalmol*. 2005 ; 123 (8) : 1102-05.
- 29 | La radioprotection des travailleurs. Exposition professionnelle aux rayonnements ionisants en France : bilan 2016. Rapport PRP-HOM 2017-00005. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), 2017 (www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/radioprotection/IRSN_Rapport-Exposition-travailleurs-2016.pdf).
- 30 | RANNOU A - Abaissement de la limite de dose au cristallin pour les travailleurs : aspects pratiques. GT-CIPR, Paris, 8 décembre 2011. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), 2011 (www.irsn.fr/GT-CIPR/Documents/o8-12-2011/GT-CIPR_o8-12-2011_3-Rannou.pdf).
- 31 | CARINOU E, FERRARI P, BIJELAC OC, GINGAUME M ET AL. - Eye lens monitoring for interventional radiology personnel: dosimeters, calibration and practical aspects of Hp(3) monitoring. A

- 2015 review. *J Radiol Prot.* 2015 ; 35 (3) : R17-34.
- 32 | PETOUSSI-HENSS N, BLOCH WE, ECKERMAN KF, ENDO A ET AL. - ICRP Publication 116. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposure. *Ann ICRP.* 2010 ; 40 (2-5) : 1-257.
- 33 | FARAH J, STRUELENS L, DABIN J, KOUKORAVA C ET AL. - A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent for interventional cardiologists. *Radiat Prot Dosimetry.* 2013 ; 157 (4) : 561-69.
- 34 | CHAMBERS CE, FETTERLY KA, HOLZER R, LIN PJ ET AL. - Radiation safety program for the cardiac catheterization laboratory. *Catheter Cardiovasc Interv.* 2011 ; 77 (4) : 546-56.
- 35 | HERTAULT A, MAUREL B, MIDULLA M, BORDIER C ET AL. - Editor's Choice. Minimizing Radiation Exposure During Endovascular Procedures: Basic Knowledge, Literature Review, and Reporting Standards. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2015 ; 50 (1) : 21-36.
- 36 | PRINCIPI S, FARAH J, FERRARI P, CARINOU E ET AL. - The influence of operator position, height and body orientation on eye lens dose in interventional radiology and cardiology: Monte Carlo simulations versus realistic clinical measurements. *Phys Med.* 2016 ; 32 (9) : 1111-17.
- 37 | CARINOU E, BRODECKI M, DOMIENIK J, DONADILLE L ET AL. - Recommendations to reduce extremity and eye lens doses in interventional radiology and cardiology. *Radiat Meas.* 2011 ; 46 (11) : 1324-29.
- 38 | BADAWY MK, DEB P, CHAN R, FAROUQUE O - A Review of Radiation Protection Solutions for the Staff in the Cardiac Catheterization Laboratory. *Heart Lung Circ.* 2016 ; 25 (10) : 961-67.
- 39 | HAQQANI PH, AGARWAL PK, HALIN NM, IAFRATI MD - Minimizing radiation exposure to the vascular surgeon. *J Vasc Surg.* 2012 ; 55 (3) : 799-805.
- 40 | BRUCHMANN I, SZERMERSKI B, BEHRENS R, GEWORSKI L - Impact of radiation protection means on the dose to the lens of the eye while handling radionuclides in nuclear medicine. *Z Med Phys.* 2016 ; 26 (4) : 298-303.
- 41 | RANNOU A - Contamination oculaire, comment réagir ? En pratique. *Repères.* 2016 ; 28 : 17-19.
- 42 | Rayonnements ionisants. Conduite à tenir en cas d'incident ou d'accident. Dossier web. INRS, 2015 (www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/ce-qu-il-faut-retenir.html).