

IRSNINSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE*Faire avancer la sûreté nucléaire*

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

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION	3
2 CONTEXTE HISTORIQUE.....	3
3 IDENTIFICATION DES ACTIVITES PROFESSIONNELLES A RISQUE	4
3.1 ASPECTS GENERAUX	4
3.2 RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE	5
3.3 CURIETHERAPIE, MEDECINE NUCLEAIRE ET RECHERCHE MEDICALE	7
3.4 DOMAINE INDUSTRIEL	9
4 BONNES PRATIQUES DE RADIOPROTECTION.....	10
4.1 ASPECTS GENERAUX	10
4.2 DOMAINE DE LA RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE	11
4.2.1 moyens de radioprotection en radiologie interventionnelle.....	11
4.2.2 Bonnes pratiques professionnelles pour optimiser l'exposition individuelle en radiologie interventionnelle	14
4.3 DOMAINES DE LA CURIETHERAPIE, MEDECINE NUCLEAIRE ET RECHERCHE.....	15
4.4 BONNES PRATIQUES DE RADIOPROTECTION DANS LE DOMAINE INDUSTRIEL.....	16
5 QUELLE SURVEILLANCE DOSIMETRIQUE ?	16
5.1 GRANDEUR DOSIMETRIQUE	16
5.2 COMMENT ESTIMER L'EXPOSITION DU CRISTALLIN ?	17
6 RECOMMANDATIONS DE L'IRSN	20
7 ANNEXE	23
8 BIBLIOGRAPHIE	24

1 INTRODUCTION

Le 21 avril 2011, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) a publié une déclaration en faveur d'une réduction de la limite de dose équivalente au cristallin de l'œil pour les travailleurs dans les situations d'expositions planifiées [1]. Elle recommande désormais une limite de dose de 20 mSv par an, en moyenne sur des périodes définies de 5 ans, sans dépasser 50 mSv au cours d'une même année.

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a adopté cette nouvelle limite lors de la révision de ses Normes de base en radioprotection (BSS)¹. Le Groupe d'experts de l'Article 31 du Traité Euratom a exprimé une opinion favorable à la prise en compte de celle-ci et par suite le projet de révision de la directive européenne « Normes de base » a également adopté cette limite² tout en laissant la limite admissible pour le public à 15 mSv/an.

L'Autorité de Sûreté Nucléaire, dans ce contexte et dans la perspective des travaux de transposition de cette future directive, a demandé l'avis de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire sur les bonnes pratiques attendues en matière de radioprotection des travailleurs, en particulier dans le cadre de la radiologie interventionnelle et des blocs opératoires où sont réalisés des actes interventionnels.

Au-delà du domaine médical, l'ASN a souhaité avoir un inventaire des pratiques professionnelles concernées devant permettre de décliner, pour chacune d'entre elles, des recommandations de bonnes pratiques en matière de radioprotection (Courrier CODEP-DIS-2013-018618 du 8 avril 2013).

La présente fiche technique répond à cette demande et vient en complément de l'avis de l'IRSN en date du 24 juin 2011 sur les conséquences pratiques d'une mise en application réglementaire de cette recommandation en termes de radioprotection des travailleurs et de surveillance dosimétrique dans les domaines où sont utilisés des rayonnements ionisants.

2 CONTEXTE HISTORIQUE

Dans le passé, il était généralement considéré que, dans les situations où l'exposition était relativement homogène, le respect de la limite de dose efficace de 20 mSv/an garantissait une exposition du cristallin largement inférieure à la limite de 150 mSv/an. Aussi seules les situations d'exposition notablement hétérogène pouvaient éventuellement être retenues comme nécessitant un suivi dosimétrique particulier du cristallin.

¹ Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - Interim Edition. General Safety Requirements Part 3. 2011.

² Proposal for a Council Directive laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation. Doc 8682/2/13. Version 24 May 2013.

Le domaine de la radiologie interventionnelle est connu de longue date comme pouvant conduire, dans certaines procédures, à une exposition non négligeable du cristallin. De nombreuses études ont d'ailleurs été menées depuis plus de 20 ans afin d'évaluer cette exposition et l'impact d'un certain nombre de facteurs. Il convient cependant de noter que les données dosimétriques publiées sont parfois difficiles à comparer, notamment les plus anciennes, car elles :

- ne sont pas toujours exprimées dans la même grandeur ($H_p(10)$, $H_p(3)$, $H_p(0,07)$)... ou obtenues au même point de mesure (front, cou, coin de l'œil...) ;
- ont été obtenues tantôt en dynamique sur l'opérateur durant une (ou plusieurs) intervention(s) et tantôt en statique sur un fantôme anthropomorphe ;
- résultent parfois de calculs ne simulant pas exactement la position de l'opérateur.

Pour les autres applications susceptibles d'entraîner une exposition des yeux, telles que la médecine nucléaire, la curiethérapie ou la recherche, de même que pour le domaine industriel, les données sont beaucoup plus rares. Cela peut certainement s'expliquer par le fait que subjectivement la dosimétrie « corps entier » garantissait le respect de l'actuelle limite « cristallin ».

3 IDENTIFICATION DES ACTIVITES PROFESSIONNELLES A RISQUE

3.1 ASPECTS GENERAUX

L'AIEA, dans un projet de document TECDOC concernant les implications pour la radioprotection du personnel de la nouvelle limite de dose au cristallin³, identifie les personnels susceptibles de recevoir des doses significatives au cristallin en fonction de leur activité professionnelle. Ce document propose également une démarche concernant la nature de la surveillance à mettre en œuvre et la grandeur dosimétrique à utiliser en fonction des caractéristiques du rayonnement auquel le cristallin est soumis. L'IRSN considère que la démarche retenue par l'AIEA est pragmatique, tenant compte notamment de ce que les instances internationales compétentes pour définir la grandeur dosimétrique à utiliser pour la mesure (ICRU) et pour étalonner les dosimètres (ISO) n'ont pas encore édicté de normes en la matière.

³ Document TECDOC de l'AIEA dans sa version du 5 juin 2013 : Implications for occupational protection of the new dose limit for the lens of the eye (2013).

En accord avec les critères mentionnés dans le document de l'AIEA, l'IRSN identifie les situations suivantes comme pouvant conduire à une exposition significative du cristallin comparativement au reste de l'organisme :

- le travailleur porte un EPI (en radiologie interventionnelle par exemple),
- la géométrie du poste de travail conduit à ce que la tête se trouve davantage exposée que le reste du corps (opérations en boîte à gants par exemple),
- le travailleur est exposé directement à des rayonnements peu pénétrants (émission β d'énergie max > 700 keV ou photons de basse énergie).

Comme le souligne le document de l'AIEA, le nombre de travailleurs le plus important pouvant être concernés par un risque d'exposition du cristallin se trouve dans le domaine médical. L'activité la plus citée pouvant conduire à une exposition significative du cristallin est la radiologie interventionnelle, qu'elle soit réalisée dans des salles dédiées ou dans des blocs opératoires (cardiologie, neuroradiologie, interventions chirurgicales, fluoroscopie...). Cela s'est d'ailleurs traduit par un grand nombre de publications dont les résultats d'un certain nombre ont été repris dans la suite de ce rapport.

Outre la radiologie interventionnelle, d'autres domaines méritent d'être considérés. Il s'agit, pour le domaine médical, de la médecine nucléaire (y compris les cyclotrons), de la curiethérapie et de la recherche biomédicale en raison de l'utilisation de radionucléides émetteurs de photons de basse énergie, et/ou de bêtas d'énergie maximale supérieure à 0,7 MeV. En ce qui concerne les domaines industriel et nucléaire, il peut s'agir des activités où le cristallin est davantage exposé que le corps entier, comme par exemple les opérations en boîtes à gants, le démantèlement des installations, la manipulation du plutonium, certaines opérations de maintenance...

3.2 RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

Dès le début de la radiologie interventionnelle, qui existe depuis une quarantaine d'années, l'attention a porté sur le niveau d'exposition aux rayonnements élevé au niveau de certains organes comme le thorax, la thyroïde ou les mains. Compte tenu de la différence entre les limites « corps entier » et « cristallin », les yeux ne faisaient pas l'objet d'un intérêt particulier.

Lors des procédures de radiologie interventionnelle, et en bloc opératoire, le corps entier est exposé au rayonnement diffusé par le patient et la table d'opération, mais aussi au rayonnement de fuite provenant du tube. L'opérateur est systématiquement protégé par un tablier d'au moins 0,35 mm de plomb et donc exposé à des niveaux très inférieurs à la limite de 20 mSv/an. Par contre le cristallin n'est pas toujours protégé (lunettes ou écrans), il risque alors d'être soumis, pour certaines procédures, à des niveaux proches voire supérieurs à la nouvelle limite de 20 mSv/an.

Rappelons que la haute tension des faisceaux de rayons X varie généralement entre 70 et 110 kV pour la radiologie et entre 80 et 140 kV en scanographie. Or, ce sont les photons dont l'énergie est comprise entre environ 30 et 200 keV qui délivrent une dose maximale au cristallin par unité de kerma dans l'air [2].

Le tableau 1 regroupe des données correspondant à une synthèse de la littérature rapportée dans le rapport 168 de la NCRP [3] et la publication 85 de la CIPR [4] pour différentes procédures, hors cardiologie. La plupart des procédures citées conduisent en moyenne à des expositions inférieures à 1 mSv. Dans d'autres publications ne figurant pas dans le tableau 1, les auteurs rapportent des expositions très variables comprises entre moins de 0,1 mSv/procédure en neuroradiologie interventionnelle et 3 mSv/procédure hépatique [5-14].

Tableau 1 : Doses équivalentes à l'œil pour différentes procédures de radiologie interventionnelle

Procédure	Doses à l'œil (μ Sv/procédure)	Protection des yeux*	Référence publication
Actes interventionnels vasculaires et Cardiologie	200/300	N	Vañó et al. Br J Radiol (1998) [15].
Actes vasculaires	10	N	Ho et al. J Vasc Surg (2007) [16].
Angiographie cérébrale Embolisation artérielle	13	N	Marshall et al. Br J Radiol (1995) [17]
Coronarographie/Stent	13	O (L)	Efstathopoulos et al. Br J Radiol (2011) [18]
Cathétérisme cardio pédiatrique	88	?	Li et al. Health Phys (1995) [19]
Cathétérisme cardiaque	15-53	O (E)	Pratt et al. Br J Radiol (1993) [20]
Rythmologie par radiofréquence	280	O (E)	Calkins et al, Circulation (1991) [21]
Nephrolithotomie percutanée	1,9	?	Hellawell et al. J Urol (2005) [22]
Nephrolithotomie percutanée	26	N	Safak et al. J Radiol Prot (2009) [23]
Draînage percutané	12,5 (max 78)	?	Vehmas, Br J Radiol (1997) [24]
Infiltration vertébrale	4	N	Botwin et al. Arch Phys Med Rehabil (2002) [25]
Vertébroplastie	84	L ou E ?	Harstall et al. Spine (2005) [26]
Cholangio -pancréatographie par voie rétrograde	550	N	Buls et al. Br J Radiol (2002) [27]
Cholangio -pancréatographie par voie rétrograde	94-340	?	Olgar et al. J Radiol Prot (2009) [28]
Cholangio -pancréatographie par voie rétrograde	10-100	N	O'connor et al, Br J Radiol (2012) [29]
Orthopédie	50	N	Tsalafoutas et al. Radiat Prot Dosi (2008) [30]
Hystérosalpingographie	220	N	Suliman et al. Radiat Prot Dosi (2008) [31]

* L : lunettes - E : écran

Les données du tableau 1 peuvent être complétées par les études suivantes. Dans la publication de Vaño *et al.* [32] les auteurs ont estimé la dose aux yeux pour différentes procédures de radiologie interventionnelle hors cardiologie. En l'absence de protection (lunettes et/ou écran) les doses typiques au cristallin sont comprises entre 0,4 mSv et 11 mSv par procédure. En présence de protection, l'exposition au cristallin varie entre 11 µSv et 336 µSv par procédure. Une étude IRSN récente dans le domaine de la neuroradiologie a montré que la dose équivalente au cristallin sans protection variait de 30 à 115 mSv/an selon l'activité du neuroradiologue [33].

Le bilan des vastes campagnes de mesure réalisées dans le cadre du projet européen ORAMED [34], auquel l'IRSN a contribué, montre que les doses $H_p(0,07)$ au cristallin, en l'absence de protection, sont de l'ordre de 0,05 mSv/procédure en cardiologie interventionnelle et comprises entre 0,05 et 0,2 mSv/procédure en radiologie interventionnelle hors cardiologie. Il est à noter que les doses reçues au niveau de l'œil droit et de l'œil gauche peuvent être très différentes en fonction de la position du tube par rapport à l'opérateur.

L'étude récente d'Antic *et al.* [35] en cardiologie interventionnelle fait état de dose $H_p(3)$ de 121 µSv/procédure au cristallin. Dans l'étude de Theocharopoulos *et al.* [36] consacrée à la rythmologie, l'exposition des yeux varie entre 153 et 389 µSv/procédure selon la position de l'opérateur par rapport à la voie d'abord.

En ce qui concerne la scanographie, les actes interventionnels de type biopsie rachidienne, pulmonaire ou abdominale conduisent à des doses aux yeux comprises entre 7 et 48 µSv par procédure [37].

3.3 CURIETHERAPIE, MEDECINE NUCLEAIRE ET RECHERCHE MEDICALE

Jusqu'à ce jour on pouvait s'interroger sur l'opportunité d'évaluer la dose au cristallin dans les applications de curiethérapie « bas débit » manuelle utilisant des sources d'iridium 192. Cependant ces sources étant appelées à disparaître rapidement (début 2014), il n'y a plus lieu de s'en préoccuper, les applications restantes de curiethérapie se faisant au moyen d'un projecteur de sources. Une étude française de Gagna *et al.* sur la radioprotection lors de traitement par implants permanents d'iode 125 a montré que l'exposition du cristallin (dosimètre au front) sans protection était inférieure à 17 µSv/implantation (moins de 100 µSv pour 6 implantations) de même que celle du corps entier [38]. Les auteurs concluent que le port d'EPI n'est pas nécessaire sauf, éventuellement, pour la phase de contrôle radiologique.

En médecine nucléaire et en recherche médicale, les principaux radionucléides utilisés émettent des rayonnements photoniques compris entre quelques dizaines de keV (iode 125) et quelques centaines de keV (carbone 11, fluor 18, iode 131...). Certains radionucléides

émettent aussi du rayonnement bêta, le plus énergétique étant l'yttrium 90 avec un bêta d'énergie max de 2,28 MeV. Il convient cependant de ne considérer que le rayonnement bêta susceptible d'atteindre le cristallin, soit 3 mm de profondeur, c'est-à-dire les émissions d'énergie supérieure à environ 700 keV.

Dans une publication de 2012, Summers *et al.* apportent des éléments intéressants sur le niveau d'exposition des yeux par type de tâche et sur l'extrapolation à l'année compte tenu du mode de fonctionnement de leur service (tableau 2) [39]. Il apparaît que la dose annuelle aux yeux, exprimée en $H_p(3)$, est de l'ordre de 4,5 mSv pour une charge de travail comportant la préparation et l'injection de radiopharmaceutiques ainsi que l'administration de gélules d'iode 131 de 0,37 et 3,7 MBq. Cependant si on extrapole les données de Summers *et al.* ainsi que celles de Leide-Svegborn concernant l'injection de ^{99m}Tc et ^{18}F à une activité classique d'un service de médecine nucléaire, les doses à l'œil peuvent atteindre des valeurs très supérieures à la limite de 20 mSv/an. Le tableau 3 reprend les différentes données utilisées pour cette estimation [39,40]. En pratique, ces activités sont réparties sur plusieurs intervenants ; ainsi sur la base de 5 personnes effectuant ces injections on aboutirait à une dose annuelle moyenne à l'œil de l'ordre de 22 mSv.

Tableau 2 : Dose aux yeux par type de procédure et dose totale annuelle pour une charge de travail typique d'un opérateur [d'après 39]

Procédure	Dose moyenne à l'œil/procédure	Fréquence/nombre de procédures	Dose annuelle à l'œil (mSv)
Préparation des radiopharmaceutiques	18 μSv /session	1 session/semaine	0,90
Libération des radiopharmaceutiques (hors ^{131}I)	18 μSv /session	1 session/semaine	0,90
Libération du ^{131}I	10 μSv /session	1 session/semaine	0,50
Administration du ^{131}I (gélules de 0,37 GBq)	2 μSv /gélule	2 gélules/semaine	0,18
Administration du ^{131}I (gélules de 3,7 GBq)	18 μSv /gélule	10 gélules/an	0,18
Injection des radiopharmaceutiques au ^{99m}Tc	14 μSv /575 MBq		1,85

Tableau 3 : Estimation de la dose aux yeux pour les actes de médecine nucléaire utilisant le ^{99m}Tc et le ^{18}F à partir des données de Summers *et al.* et de Leide-Svegborn [39, 40].

Radionucléide	Dose moyenne à l'œil ($\mu\text{Sv}/\text{GBq}$)	Activité injectée/acte (GBq)	Nombre d'actes/an ^(b)	Dose annuelle à l'œil (mSv)
^{99m}Tc	22 ^(a)	0,7	1800	28
^{18}F	56	0,35	4000	78

^(a) moyenne des valeurs extraites de [28] et [29].

^(b) d'après les données 2012 du service de médecine nucléaire de l'Institut Gustave-Roussy

Cependant ces estimations apparaissent excessives au regard d'autres données, telles que celles publiées dans le bilan annuel de l'IRSN relatif à l'exposition des travailleurs [42]. Ce bilan montre que, dans les domaines de la médecine nucléaire et de la recherche, l'exposition du corps entier est largement inférieure à 20 mSv/an, voire même à 6 mSv/an. Comme le port de protections individuelles est peu fréquent en médecine nucléaire, l'exposition du corps entier indiquée par le dosimètre passif et, le cas échéant, par le dosimètre opérationnel, peut être considérée comme un indicateur de l'exposition du cristallin compte tenu du type de rayonnements en jeu. C'est d'ailleurs ce qu'a montré Kopec et al. [41], essentiellement pour les émetteurs de photons, pour lesquels la dose aux yeux exprimée en $H_p(3)$ était quasiment identique à la dose « corps entier » exprimée en $H_p(10)$.

Compte tenu des incertitudes qui demeurent, une exposition significative du cristallin en médecine nucléaire ne peut pas être totalement exclue. Il paraît donc indispensable que toute étude de poste dans ce domaine comporte une évaluation de l'exposition des yeux. En fonction des résultats de cette étude, il faudra s'interroger sur la nécessité de recommander une dosimétrie du cristallin voire même le port de lunettes de protection, ou sur la possibilité de se limiter à extrapoler les données de la dosimétrie « corps entier ».

3.4 DOMAINE INDUSTRIEL

De manière générale, les risques d'exposition du cristallin existent dès lors qu'un opérateur se trouve à proximité d'une source dont le rayonnement, compte tenu de la géométrie de la source et de la position de l'opérateur, est susceptible d'atteindre significativement les yeux de ce dernier. En pratique, cela peut correspondre aux activités en boîte à gants (en particulier lorsque le visage se trouve face au rond de gant dépourvu de protection biologique), aux opérations de démantèlement (activités d'inventaire, de reconditionnement, de tri et de découpe de déchets), de contrôle (contrôles qualité visuels des pastilles de combustible, des assemblages combustibles... ; inventaires matières de plutonium en boîte-à-gants...) et de maintenance d'équipements contaminés en fonctionnement normal. Certaines situations accidentelles peuvent également exposer le cristallin, notamment la projection de liquides ou la remise en suspension d'aérosols conduisant à une contamination oculaire.

Parmi les rares informations relatives au domaine industriel, celles issues du projet ISEMIR [43] qui concernent la radiographie industrielle indiquent que la dose au cristallin n'est pas contrôlée et que des données ne sont pas disponibles. Le groupe de travail de ce projet considère que dans ce domaine :

- il n'y a pas besoin de surveillance complémentaire ;
- le corps est exposé uniformément (source à grande distance) ;
- la dose efficace est un bon estimateur de la dose au cristallin ;
- il n'y a pas besoin de mesures complémentaires de protection ;

- la dose au cristallin bénéficie également des actions et contraintes de dose appliquées à la dose efficace.

Pour les auteurs, seule une situation accidentelle (source non en position de stockage) pourrait entraîner une dose au cristallin supérieure à la dose efficace.

Dans le domaine des installations nucléaires, une étude d'EDF [44] conclut que :

- la réparation des triangles PZR et le remplacement des cannes chauffantes PZR seront des activités à surveiller au niveau de l'exposition du cristallin ;
- les activités à risque nécessitent le port de dosimètres adaptés.

De même, une étude d'AREVA [45] a porté sur divers ateliers où les photons ont une énergie moyenne de l'ordre de 60 keV. Les mesures réalisées montrent que pour certains postes de travail en boîte à gants la valeur de 20 mSv/an au cristallin est approchée, voire dépassée en l'absence de protection. Aussi les auteurs se posent la question d'une éventuelle radioprotection du cristallin et du port d'une dosimétrie adaptée sachant que les tests sur l'atténuation des visières des masques de protection des voies respiratoires actuels ne sont pas concluants pour envisager leur utilisation. Ils souhaitent de plus pouvoir utiliser la dosimétrie « corps entier » comme mesure permettant d'évaluer la dose au cristallin.

Au final, les données fragmentaires montrent qu'il est difficile d'apprécier précisément les besoins d'une surveillance dosimétrique du cristallin pour les travailleurs du domaine industriel. L'identification des postes à risque devra être poursuivie sur la base des critères énoncés au § 3.1

4 BONNES PRATIQUES DE RADIOPROTECTION

4.1 ASPECTS GENERAUX

En préalable à toute considération sur les bonnes pratiques de radioprotection et ce quel que soit le domaine d'activité considéré, il convient de rappeler que :

- la radioprotection repose sur les 3 facteurs bien connus : temps - distance - écran, afin d'appliquer au mieux le principe fondamental qui veut que toute exposition soit aussi basse que raisonnablement possible (ALARA) ;
- l'étude de poste est un élément essentiel pour parvenir à maîtriser et à minimiser les risques d'exposition et qu'en conséquence, le risque d'exposition du cristallin doit être clairement considéré lors de la réalisation de cette étude.

Par analogie avec la manière dont les risques d'exposition des travailleurs au corps entier, à la peau et aux extrémités sont gérés, il pourrait être logique de n'envisager une protection et

une surveillance dosimétrique des yeux que dans les situations où la limite réglementaire correspondante fixée pour le public, soit 15 mSv/an, est susceptible d'être dépassée. Par ailleurs, s'il est souhaitable d'éviter toute exposition inutile, il convient de s'interroger « jusqu'où il est raisonnable d'optimiser ? » l'exposition du cristallin sachant que le risque afférent est celui d'apparition d'effets déterministes (et non stochastiques, comme c'est le cas pour le corps entier) que le respect de la limite suffit en principe à éviter. Dans un grand nombre de situations, la démarche d'optimisation mise en œuvre, notamment par des actions à la source, pour limiter la dose efficace aura également un impact positif sur l'exposition du cristallin et une démarche spécifique vis-à-vis de ce dernier ne sera pas obligatoirement nécessaire.

4.2 DOMAINE DE LA RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

A ce jour les méthodes et moyens de protection pour la radiologie interventionnelle sont bien connus car ce domaine a été identifié depuis plusieurs décennies comme domaine à risque pour le cristallin. Cependant aucun dispositif réellement ergonomique pour la surveillance systématique de l'exposition des yeux n'était proposé. Cette situation est certainement liée au fait que rares étaient les situations où la limite de 150 mSv risquait d'être dépassée et que le risque de cataracte n'a pas le même impact qu'un risque de cancer.

4.2.1 MOYENS DE RADIOPROTECTION EN RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

Bien que le risque soit identifié depuis relativement longtemps et que plusieurs types de dispositifs existent pour la protection des yeux (lunettes plombées, visière plombée, cabine, écran plafonnier...), les contraintes associées à leur utilisation et le niveau insuffisant de sensibilisation vis-à-vis de l'exposition du cristallin font qu'actuellement tous les moyens potentiellement disponibles sont loin d'être utilisés. Il faut en effet tenir compte du fait que l'opérateur doit mener à bien son intervention quelles que soient sa durée, sa complexité... Il faut donc veiller à ce que les dispositifs de protection restent ergonomiques et ne gênent en rien la réalisation de l'acte, sans oublier la nécessité de disposer pour certains opérateurs de lunettes de protection adaptées à leur vue.

L'efficacité de protection des écrans est directement dépendante de la nature du matériau et de son épaisseur. Le tableau 4 rend compte de cette efficacité dans le cas de rayonnements photoniques issus de générateurs X, pour différentes hautes tensions et épaisseurs de plomb.

Tableau 4 : Ordre de grandeur de la transmission des rayons X en fonction de l'épaisseur de plomb (mm) et de la haute tension (kV) [46]

Epaisseur de plomb (mm)	Haute tension (kV)			
	60	80	90	100
0,25	0,003	0,025	0,05	0,07
0,5	0,0003	0,007	0,015	0,025
0,75	0,00005	0,002	0,006	0,01
1	0,00001	0,0008	0,003	0,005

Les protections peuvent se classer en 2 types : les individuelles (lunettes, visière et cabine), et les collectives (écrans plafonniers) :

- Les lunettes de protection plombées proposées sur le marché ont des épaisseurs équivalentes en Pb de 0,5 mm ou de 0,75 mm apportant une atténuation d'au moins 90 % [47] (photo 1) et présentant un bon compromis poids-efficacité. Les protections latérales vont de 0,25 à 0,75 mm de Pb. Il convient de privilégier des lunettes dont le verre plombé est d'une surface suffisante pour couvrir largement les yeux et qui comportent des protections latérales plombées. Il est à noter qu'il n'existe pas à ce jour de norme pour les lunettes de protection vis-à-vis des rayonnements ionisants.
- D'autres équipements individuels, beaucoup moins répandus, existent, telles les visières en acrylique plombé de protection équivalente à 0,1 mm de plomb, protégeant l'ensemble du visage (photo 2). Ces visières, qui peuvent être intéressantes pour les porteurs de verres correcteurs, apportent d'après le fabricant une protection qui varie de d'environ 90 % à 70 kV à environ 80 % à 140 kV.
- Des cabines qui permettent une protection de l'ensemble du corps, à l'exception des membres supérieurs, ont également été mises sur le marché mais leur usage est peu répandu. De plus leur ergonomie réserve leur utilisation à certains actes de radiologie interventionnelle comme la rythmologie (photo 3).
- Les écrans plombés suspendus, dits aussi écrans plafonniers ou suspensions plafonnières, sont constitués d'une vitre en acrylique plombé de 0,50 mm équivalent Pb ou d'une vitre en verre plombé de 2 mm équivalent Pb (photo 4). Ces équipements, quand leur utilisation est compatible avec l'acte clinique, permettent de réduire la dose au cristallin jusqu'à 97 % à 70-90 kV [47].



Photo 1: Paire de lunettes de protection avec déflecteur (Sté Amray Medical protection).



Photo 2: Visière en acrylique plombé (Sté Proméga).



Photo 3: Cabines de protection simple ou double dédiées à la rythmologie et la cardiologie. (Sté Lemer Pax)



Photo 4: Différents types d'écrans plafonniers plombés (Sté Amray Medical protection).

4.2.2 BONNES PRATIQUES PROFESSIONNELLES POUR OPTIMISER L'EXPOSITION INDIVIDUELLE EN RADIOLOGIE INTERVENTIONNELLE

Outre les moyens de protection de l'opérateur décrits au § 4.1.1, il est possible de réduire l'exposition de l'opérateur en respectant les bonnes pratiques professionnelles. Cela concerne non seulement la position du tube mais aussi tous les paramètres techniques permettant d'optimiser l'exposition du patient car l'exposition de l'opérateur est étroitement liée à celle du patient [48].

4.2.2.1 Influence des paramètres techniques sur la dose

Dans une publication de 2006, Vaño *et al.* ont présenté l'influence de différents facteurs opérationnels sur l'exposition des opérateurs lors d'actes de radiologie interventionnelle sur une installation radiologique Philips (tableau 5) [49].

Tableau 5 : Influence du changement de différents paramètres opérationnels sur la l'exposition du personnel (d'après [49])

Facteur technique	Facteur de réduction de l'exposition de l'opérateur
Changement de la radioscopie haut-débit de dose à bas-débit de dose	2,6
Changement de champ d'amplificateur de 23 cm à 17 cm pour un patient de 20 cm d'épaisseur	1
Changement du mode d'acquisition radioscopique du mode ciné au mode bas-débit de dose	8,3

Une étude menée à l'IRSN [33] a également permis d'identifier, pour une installation Siemens, tous les moyens techniques qui réduisent la dose au patient et l'exposition de l'opérateur, ainsi que le niveau de réduction attendu (Annexe 1).

Enfin, pour information, notons que la corpulence du patient a aussi un impact sur l'exposition du personnel ; par exemple le passage d'un patient d'épaisseur 16 cm à 24 cm augmente cette exposition d'un facteur 4,2 [49].

4.2.2.2 Recommandations pour de bonnes pratiques de radioprotection en radiologie interventionnelle

Cette liste reprend l'ensemble des bonnes pratiques de radiologie interventionnelle qui permettent de réduire l'exposition du travailleur d'une façon générale, et du cristallin en particulier [33, 47, 49]. Ces bonnes pratiques reprennent les éléments présentés aux § 4.1.1 et 4.1.2 :

- Seuls doivent être utilisés des appareils et des salles dédiés aux actes interventionnels ;
- Des équipements de protection collective doivent être disponibles ;
- Le tube à rayons X doit être positionné sous la table si la procédure le permet ;
- Dans le cas où le tube est positionné de profil, il est rappelé que les intervenants doivent être positionnés plutôt du côté du détecteur (intensificateur d'images radiologique ou détecteur plan) ;
- Utiliser le plus souvent possible les protections plafonniers ainsi que les protections de type bas-volet. L'écran plafonnier doit être placé aussi près que possible du corps du patient ;
- Lorsqu'un appareil biplan est utilisé, l'ajout d'un écran plafonnier supplémentaire protégeant du rayonnement diffusé pour les incidences latérales est très important pour la protection des yeux ;
- Lorsque l'opérateur est amené à se déplacer en cours d'intervention, l'attention doit être maintenue pour conserver un positionnement efficace de l'écran plafonnier ;
- Les équipements de protection individuelle (tablier, lunettes) doivent être disponibles et utilisés.
- Adapter la fréquence d'image optimale en radioscopie et en radiographie, sans compromettre la qualité d'image nécessaire à l'acte ;
- Privilégier le mode « *Scopie basse dose* » ;
- Réduire la dose par image en mode radiographique dès que cela est possible ;
- Limiter au maximum, voire éviter si possible le nombre d'images radiographiques ;
- Utiliser et mémoriser les acquisitions en images radioscopiques ;
- Réduire au maximum la distance entre le patient et le détecteur ;
- Adapter la collimation à la région d'intérêt ;
- Déclencher à distance l'acquisition d'image radiographique dès que possible.

4.3 DOMAINES DE LA CURITHERAPIE, MEDECINE NUCLEAIRE ET RECHERCHE

Contrairement à la radiologie interventionnelle, il n'est pas identifié de bonnes pratiques générales vis-à-vis de la protection spécifique du cristallin pour la curiethérapie, la médecine nucléaire et par analogie le domaine de la recherche médicale.

En curiethérapie, compte tenu de la disparition de certaines techniques (césium 137 et iridium 192 à bas débit) et des spécificités des techniques actuelles (iridium 192 à débit pulsé

et haut débit, grains d'iode 125), la protection du cristallin ne semble pas être nécessaire. Il conviendra de s'en assurer lors de l'étude de poste.

En médecine nucléaire, à la lumière d'incidents récents ayant entraîné une contamination des yeux, il est recommandé le port de lunettes (ou de visière) de protection vis-à-vis de projections. Par ailleurs, les données rapportées au § 3.3 montrent qu'il ne peut pas être exclu un risque du dépassement de 20 mSv/an au cristallin selon le type d'activité et/ou d'organisation du service (nombre de personnes sur lesquelles l'activité est répartie, injecteur automatique...). Ce constat conduit à recommander une actualisation des études de poste intégrant une évaluation de la dose au cristallin, ces études pouvant conduire *in fine* à recommander le port de verres plombés.

4.4 BONNES PRATIQUES DE RADIOPROTECTION DANS LE DOMAINE INDUSTRIEL

Il n'est pas identifié à ce jour de bonnes pratiques documentées. Pour ce qui concerne les postes de travail en boîtes à gants, la prise en compte du risque d'exposition du cristallin doit avant tout se faire à la conception des équipements. Le cas échéant, le port de lunettes plombées ou autres type d'EPI viendra compléter les protections collectives mises en œuvre. Pour les autres postes de travail identifiés comme à risque au regard des critères définis au § 3.1, les bonnes pratiques à mettre en œuvre qui relèvent du cas par cas, s'appuieront sur les conclusions des études de poste. Seul le port de lunettes de protection peut être recommandé de manière générique dans la mesure où il est compatible avec les autres équipements de protection (masque par exemple).

5 QUELLE SURVEILLANCE DOSIMETRIQUE ?

La grandeur dosimétrique adaptée à la mesure de l'exposition du cristallin est $H_p(3)$. Cependant à ce jour les dosimètres disponibles sont quasi tous étalonnés en $H_p(10)$ et/ou $H_p(0,07)$.

Concernant les conditions de mesure de l'exposition du cristallin, il n'existe pas de document normatif au niveau national ou international. Un projet de norme décrivant des procédures de surveillance de la dose au cristallin (ainsi qu'à la peau et aux extrémités) est en préparation à l'ISO. Sa publication est attendue pour 2015.

5.1 GRANDEUR DOSIMETRIQUE

La surveillance dosimétrique du cristallin doit idéalement être réalisée à l'aide de dosimètres portés au plus proche de l'œil, en intégrant si besoin la protection de verres plombés, et étalonnés en termes de $H_p(3)$ en utilisant un fantôme approprié [50-53]. La dose équivalente au cristallin peut aussi être estimée par l'utilisation de dosimètres étalonnés en $H_p(0,07)$ ou

en $H_p(10)$ dans certaines circonstances, en sachant toutefois que l'incertitude du résultat est plus grande. Le projet de publication de l'AIEA (cf. § 3) indique que pour les photons l'une ou l'autre de ces 2 grandeurs, voire les deux, peut, en fonction de l'orientation et de l'énergie du rayonnement, fournir une estimation satisfaisante de la dose équivalente au cristallin. Par contre pour les électrons dont l'énergie maximale est supérieure à 0,7 MeV, ce projet de publication précise qu'il est indispensable de réaliser une mesure en $H_p(3)$. Jusqu'à présent, la plupart des études de poste de travail réalisées dans le milieu médical ont utilisé la grandeur $H_p(0,07)$ pour estimer la dose au cristallin.

5.2 COMMENT ESTIMER L'EXPOSITION DU CRISTALLIN ?

En pratique on peut retenir deux situations d'exposition du travailleur pour définir comment estimer l'exposition du cristallin :

- L'exposition peut être considérée comme homogène. Alors, l'exposition du cristallin peut être assimilée à celle du corps entier, évaluée par le dosimètre porté à la poitrine, sous réserve de choisir la grandeur dosimétrique, $H_p(0,07)$ ou $H_p(10)$, adaptée au rayonnement à mesurer ;
- L'exposition ne peut pas être considérée comme homogène. C'est le cas lorsque la poitrine est protégée par un EPI ou par un EPC ou lorsque la géométrie du poste de travail est telle que le visage est davantage exposé que le reste du corps ; alors un dosimètre autre que celui porté à la poitrine, et placé au plus proche de l'œil, doit être privilégié.

Dans la seconde situation, idéalement le dosimètre doit être proche de l'œil tout en ne gênant pas le travail de l'intervenant et tout en intégrant la présence d'un éventuel dispositif de protection (lunettes ou visière). A ce jour, un dispositif garantissant dans toutes les circonstances une information fiable de l'exposition du cristallin n'existe pas et, dans certains cas, il peut conduire à des résultats aberrants s'il n'est pas utilisé correctement (par exemple le système proposé dans le cadre du projet européen ORAMED [54]). La photo 4 illustre cette situation auprès d'une enceinte blindée où est manipulé du fluor 18. Le travailleur à droite sur cette photo a les yeux face à la vitre alors que le dosimètre se trouve face à la protection en plomb, d'où une information erronée.



Photo 4 : Illustration du problème de positionnement du dosimètre « cristallin ».

A gauche : positionnement correct, à droite : mauvaise position du dosimètre qui est derrière la protection en plomb contrairement aux yeux de l'opérateur derrière la vitre plombée [54].

Parmi les situations d'exposition ne pouvant pas être considérées comme homogènes, un cas classique est celui où la poitrine est protégée par un EPI qui ne protège pas les yeux. Cette situation se rencontre par exemple en radiologie interventionnelle.

La solution alternative au port d'un dosimètre au plus près de l'œil souvent proposée dans ces situations est le port de deux dosimètres : le premier dosimètre est placé derrière le tablier au niveau de la poitrine et le second à l'extérieur du tablier, au niveau du cou [4,53]. Cette technique du double dosimètre, proposée à l'origine pour mieux déterminer la dose efficace, a été mise à profit par plusieurs auteurs afin d'estimer la dose au niveau du cristallin, et permis de comparer l'information du dosimètre extérieur au tablier à celle d'un dosimètre (généralement TLD) porté au niveau des yeux (ou du front). Le tableau 6 présente le bilan d'un certain nombre de publications indiquant la dose aux yeux (ou au front) et celles en un autre point (au cou au niveau de la thyroïde, ou à l'épaule gauche) correspondant à différents types de procédures de radiologie interventionnelle.

Tableau 6 : Comparaison de la dose aux yeux (ou front) avec la dose au niveau de la thyroïde ou de l'épaule gauche pour différentes procédures de radiologie interventionnelle et selon différents auteurs.

Procédure	Référence	Dose yeux (mSv/proc)	Dose cou (mSv/proc)	Dose épaule gauche (mSv/proc)
Radiologie interventionnelle	[55]	Droit 0,30 Gauche 0,28 Front 0,30	0,33	0,28
Radiologie interventionnelle sauf cardiologie	[56]	Front 8-16	20-25	31-56
Procédures neurointerventionnelles	[57]	Droit 0,03 Gauche 0,25	0,07	0,39
Procédures neurointerventionnelles	[58]	0,08	0,07	
Procédures neurointerventionnelles	[59]	22-114	14,4-44,7	
Cholangiopancreatographie rétrograde endoscopique	[27]	Front : 0,55 (max 2,78)	0,45 (max 2,38)	
Cardiologie	[55]	Droit 0,17 Gauche 0,29 Front 0,24	0,27	0,25

Selon cette approche, Martin *et al.* [60] proposent une formule permettant de relier la dose au niveau de la thyroïde, exprimée en $H_p(0,07)$, à la dose aux yeux :

$$\text{Dose yeux} = 0,75 \times \text{Dose thyroïde}$$

Cette technique de double dosimètre a l'avantage de mieux approcher la dose efficace tout en renseignant sur la dose au cristallin. Elle peut cependant fournir une information erronée si le facteur correctif utilisé n'est pas adapté à la configuration réelle.

Dans le cadre du projet européen ELDO, auquel l'IRSN a contribué, la dose mesurée au niveau des yeux d'un fantôme anthropomorphe a été comparée avec celles mesurées en de multiples points du tronc et du cou de ce fantôme (au-dessus du tablier) [61]. L'objectif de ce travail était d'apporter des éléments dosimétriques à des études rétrospectives épidémiologiques concernant le cristallin de cohortes de cardiologues interventionnels à partir de données mesurées par un dosimètre porté au niveau du tronc. La conclusion de ce travail est que la corrélation entre la dose aux yeux et la dose en différents points du tronc est relativement difficile à démontrer de façon simple, compte tenu de la très forte dispersion des résultats. Une corrélation, même faible, est néanmoins utilisable dans le cas précis d'études rétrospectives pour lesquels les incertitudes importantes demeurent acceptables à défaut de données plus précises. De plus, si l'on dispose d'informations sur les paramètres liés aux procédures réalisées, il est possible de réduire ces incertitudes. Ce travail a montré que, dans le domaine de la radiologie interventionnelle, compte tenu de la très forte dispersion des résultats, cette méthode n'est applicable qu'à des études rétrospectives et non à la surveillance de routine.

Dans le domaine industriel, les premières campagnes de mesures ont été réalisées par les exploitants des établissements d'AREVA NC du site de MELOX et de celui de la HAGUE. La méthodologie mise en place visait à évaluer les possibilités de s'affranchir de la mesure dosimétrique du cristallin, par extrapolation de la dosimétrie poitrine. Après une identification des postes de travail prenant en compte les risques d'exposition dus aux rayonnements gamma, neutrons et bêta, des mesures ont été réalisées d'une part en statique, avec des dosimètres placés sur fantômes devant des boîtes à gants, d'autre part en dynamique avec des dosimètres portés sur le front ou le masque d'agents en opération. Les résultats des dosimètres « cristallin » ont été comparés aux doses mesurées sur les dosimètres poitrine, sur et sous tablier. Ces résultats montrent que le rapport entre la dose cristallin et la dose poitrine (avec port du tablier de plomb) varie fortement d'un poste de travail à un autre. Les campagnes de mesures montrent également que pour quelques personnes, la dose au cristallin peut, par extrapolation, dépasser les 20 mSv/an [45].

Selon Gualdrini *et al.*, pour certaines énergies et angles d'incidence des neutrons, le dosimètre « corps entier » ne fournit probablement pas une évaluation conservatrice de la dose [62]. Dans ce cas, une dosimétrie neutron spécifique du cristallin serait nécessaire, mais à vérifier par des investigations complémentaires selon le projet de document TECDOC AIEA.

En résumé, si le port d'un dosimètre au plus près de l'œil, étalonné en $H_p(3)$ et intégrant l'apport d'un dispositif de protection, est la solution idéale pour estimer l'exposition du cristallin elle peut poser des problèmes pratiques, par exemple en raison du port de masque ou de la gêne occasionnée. Il faut donc envisager, malgré les réserves mentionnées plus haut, la possibilité d'estimer l'exposition du cristallin par une méthode indirecte basée sur la mesure d'un autre dosimètre à laquelle un facteur d'extrapolation, dûment validé, est appliqué.

6 RECOMMANDATIONS DE L'IRSN

Le passage de la limite de dose au cristallin de 150 mSv/an à 20 mSv/an ou 100 mSv sur 5 années consécutives avec un maximum de 50 mSv en une année oblige à :

- identifier les activités et/ou les situations à risque nécessitant une surveillance dosimétrique du cristallin ;
- définir le type de surveillance dosimétrique et la grandeur dosimétrique à utiliser ;
- identifier des moyens de protection individuelle et collective à mettre en œuvre compte tenu de l'évolution des pratiques.

Par rapport à l'approche de la radioprotection ayant pour objectif la prévention des risques stochastiques dans le cas d'une exposition du corps entier, la radioprotection du cristallin doit avoir pour objectif de limiter le risque d'apparition d'effets déterministes. Ce distinguo devrait conduire à une approche différente dans la mise en œuvre du principe ALARA, c'est-à-dire à donner plus de poids au « raisonnable » de la démarche d'optimisation à partir du moment où l'exposition est inférieure à la limite réglementaire, puisqu'en dessous de cette limite il n'y a en principe pas de risque attendu.

Tous domaines d'activité confondus, les recommandations de l'IRSN sont les suivantes :

- Former et sensibiliser les opérateurs et les acteurs de la radioprotection à tous les « outils » permettant de réduire la dose au travailleur, tant par la conception des équipements au niveau de la source que par le déploiement des protections individuelles du cristallin.

- Pour toutes les situations où l'exposition du cristallin n'est pas ou est mal connue, réaliser des études pour évaluer cette exposition et, de manière plus générale, intégrer systématiquement la dose au cristallin dans toute étude de poste.
- Mettre en œuvre une surveillance dosimétrique, selon l'approche décrite ci-après, dans les cas où l'exposition du cristallin évaluée lors de l'étude de poste est susceptible de dépasser 15 mSv/an (limite public) :

Lorsque l'estimation correcte ou enveloppe de la dosimétrie du cristallin par le dosimètre poitrine ne peut être clairement démontrée, utiliser un dosimètre individuel « cristallin » étalonné en $H_p(3)$, sauf contraintes particulières ne le permettant pas ou circonstances conduisant à une mesure non représentative.

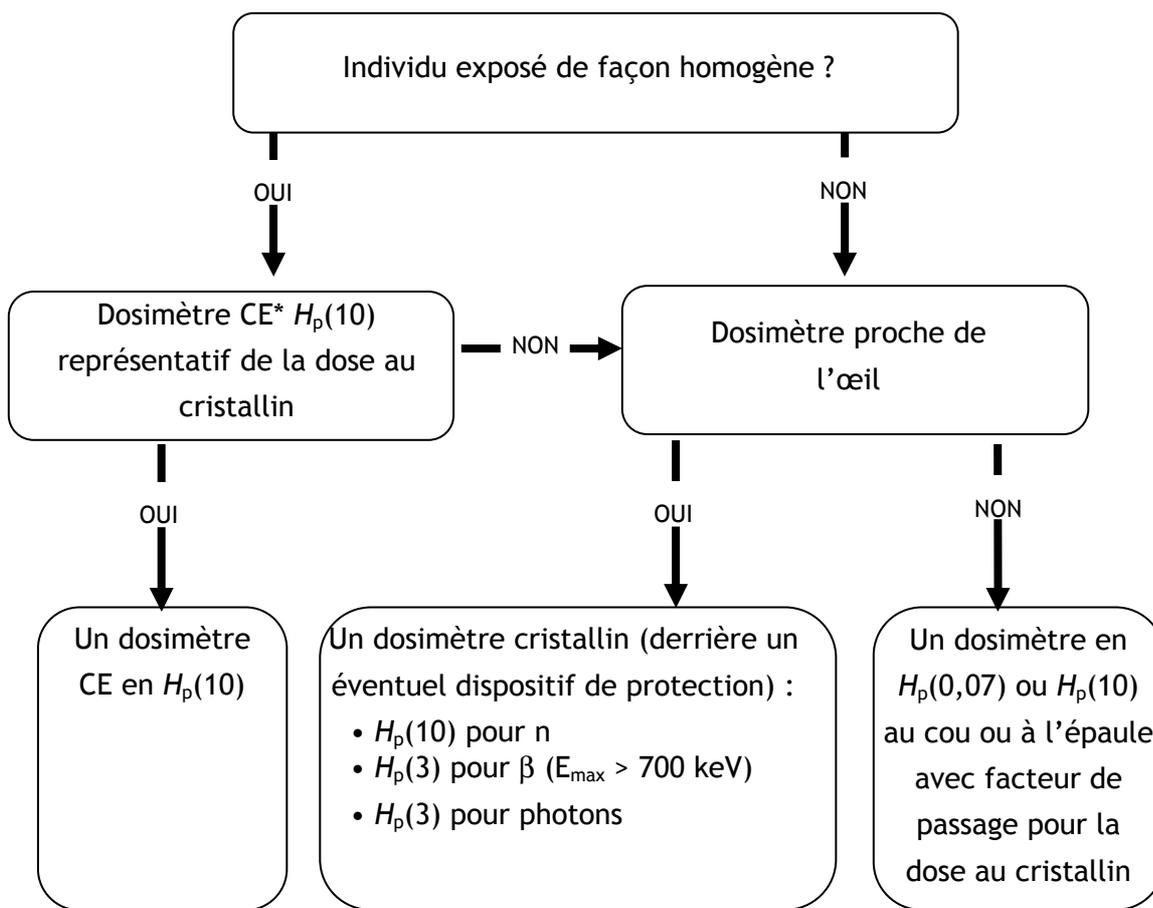
Dans les situations où l'utilisation d'un dosimètre individuel « cristallin » n'est pas possible ou bien si l'information fournie par ce dosimètre est susceptible d'être erronée, situations qui doivent être dûment justifiées, l'estimation de l'exposition du cristallin doit être réalisée :

- ✓ soit à partir du dosimètre « corps entier » auquel est appliqué un facteur correctif, déterminé par des études spécifiques, garantissant le caractère enveloppe de l'estimation ;
- ✓ soit à partir d'un dosimètre placé proche de l'œil (par exemple au niveau du cou ou de l'épaule) auquel est appliqué, si nécessaire, un facteur correctif déterminé par des études spécifiques, garantissant le caractère enveloppe de l'estimation.

Le logigramme de la figure 7 résume la démarche décrite ci-dessus.

- Même si la limite de dose au cristallin est déterminée pour prévenir l'apparition d'effets déterministes et que l'étude de poste montre que cette limite ne sera pas atteinte ou dépassée, évaluer les marges d'optimisation possibles.

En ce qui concerne le milieu médical et plus particulièrement la radiologie interventionnelle, l'IRSN rappelle que toute démarche d'optimisation de la dose au patient aura un impact bénéfique sur l'exposition du personnel. Aussi les recommandations précédentes ne peuvent s'envisager sans mise en œuvre préalable ou simultanée de cette démarche.



* CE : Corps Entier

Figure 7 : Principe de la démarche conduisant à définir les modalités de la surveillance dosimétrique du cristallin.

7 ANNEXE

Paramètres techniques réduisant la dose au patient et l'exposition de l'opérateur [33]

<i>Facteur technique</i>	<i>Acquisition initiale</i>	<i>Possibilités techniques Siemens</i>	<i>Propositions</i>	<i>Facteur de réduction de dose</i>
Fréquence d'images en mode scopie	5 à 30 images/s le plus souvent	7,5, 10, 15 et 30 images/s	7,5 ou 10 images/s	~ 2
Fréquence d'images en mode graphie	2 images/s le plus souvent	0,5, 1 et 2 images/s	0,5 ou 1 images/s	~ 2
Mode radioscopique	Scopie angio et scopie + le plus souvent	Scopie bas-débit, angio et Ht débit	Scopie bas-débit	-1,5
Dose par image radiographique	3,6 µGy voire 5,4 µGy pour certaines interventions	0,8 à 5,4 µGy	1,8	>2
Nombre de clichés en mode « graphie » (images soustraites)	Multiplés cadences	-	Limiter le nombre d'images soustraites	Variable
Distance entre le patient et le détecteur	Patient et opérateur dépendant	Réglage manuel	Réduire la distance entre le patient et le détecteur	Facteur 1,5 si la distance passe de 30 à 10 cm (distance foyer-patient constante)
Collimation du faisceau de rayons X	Non systématique	Réglage manuel	Adapter la collimation à la région d'intérêt	Réduction du rayonnement diffusé
Déclenchement à distance de l'exposition lors d'acquisition d'images radiographiques avec injection de produit de contraste	Opérateur dépendant et non systématique	Modalité disponible	Privilégier l'acquisition à distance en fonction de l'intervention qui est pratiquée	Réduction de dose pour l'opérateur (inverse carré de la distance)
Position tube de profil	Opérateur et installation dépendant	Réglage manuel	Positionner le tube à rayons X à l'opposé de l'opérateur	~ 2
Lunettes plombées avec des écrans latéraux / sans écrans latéraux	Non porté mais disponible	-	Porter des lunettes plombées	Entre 8 et 10 aux cristallins / Entre 2 et 3
EPC	Utilisé dès que l'intervention le permet	-	Position optimale des EPC	>2
Position du personnel dans la salle	Personnel dépendant	-	Utiliser le paravent plombé mobile pour l'équipe	~ 2

8 BIBLIOGRAPHIE

- [1] ICRP, 2012 ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118. Ann. ICRP 41(1/2).
- [2] ICRP, 1996. Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4).
- [3] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. Radiation Dose Management for Fluoroscopically Guided Interventional Medical Procedures. NCRP Report No. 168, Bethesda, MD., NCRP (2010).
- [4] ICRP, 2000. Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures. ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30 (2).
- [5] AMIEL M. Irradiation du médecin, du patient et du personnel médical dans les explorations cardiaques et vasculaires. J Radiol Electrol Med Nuc, 58:815-816 (1977).
- [6] GUSTAFSSON M et al. Personal exposure to radiation at some angiographic procedures. Radiology, 140:807-811(1981).
- [7] SANTEN B C et al. Exposure of the radiologist to scattered radiation during angiography. Radiology, 140:807-811(1981).
- [8] JEANS S P et al. An investigation of the radiation dose to staff during cardiac radiological studies. Br J Radiol. 58, 1228-1229 (1985).
- [9] JOHNSON L W et al. Review of radiation safety in the cardiac catheterization laboratory. Catheterization and Cardiovascular Diagnosis (1992).
- [10] GERMANAUD J et al. Radioprotection des opérateurs lors des cholangio-pancréatographies rétrogrades endoscopiques. Gastro Clin Biol (1993).
- [11] SAPOVAL M et al. Radioprotection in interventional radiology: should we be concerned? Radiology, 185P:364(1992),
- [12] BARTOLI J M et al. Radiation dose to the patient and operator in vascular radiology: a multicenter study. World Congress on medical Physics and Biomedical Engineering, Nice, 14-19 September (1997).
- [13] MORIKATE T et al. Dose Measurement on Both Patients and Operators during Neurointerventional Procedures Using Photoluminescence Glass Dosimeters. Am J Neuroradiol 29:1910-1917 (2008).
- [14] AUBERT B et al. Évaluation des expositions en médecine nucléaire et radiologie interventionnelle. XXXe congrès de la SFPH (1991).
- [15] VAÑO E et al. Radiation Exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology Br J Radiol 71: 954-960 1998.

- [16] HO P et al. Ionizing radiation absorption of vascular surgeons during endovascular procedures. *J Vasc Surg. Sep*;46 (3):455-9 (2007).
- [17] MARSHALL N W et al. Patient and staff dosimetry in neuroradiological procedures. *Br. J. Radiol.* 68, 495-501 (1995).
- [18] EFSTATHOPOULOS P et al. Occupational radiation doses to the extremities and the eyes in interventional radiology and cardiology procedures *Br. J. Radiol.* 84, 70-77 (2011).
- [19] LI L B et al. Occupational exposure in pediatric cardiac catheterization *Health Phys.*, 69, 261-4 (1995).
- [20] PRATT T A et al. Factors affecting the radiation dose to the lens of the eye during cardiac catheterization procedures *Br. J. Radiol.* 66, 346-350 (1993).
- [21] CALKINS H et al. Radiation exposure during radiofrequency catheter ablation of accessory atrioventricular connections. *Circulation.*84 (6), 2376-82 (1991).
- [22] HELLAWELL G O et al. Radiation exposure and the urologist: what are the risks? *J. Urol.* 174 948-952 (2005).
- [23] SAFAK M et al. Radiation doses of patients and urologists during percutaneous nephrolithotomy *J.Radiol.Prot.*29 409-415 (2009).
- [24] VEHMAS T. Radiation exposure during standard and complex interventional procedures. *Br J Radiol* 70, 296-298 (1997).
- [25] BOTWIN K et al. Radiation exposure of the spinal interventionalist performing fluoroscopically guided lumbar transforaminal epidural steroid injections *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* Vol.83, 5 697-701, (2002).
- [26] HARSTALL R et al. Radiation exposure to the surgeon during fluoroscopically assisted percutaneous vertebroplasty: a prospective study, *Spine* 30, 1893-1898 (2005).
- [27] BULS N et al. Patient and staff exposure during endoscopic retrograde cholangio-pancreatography *Br J Radiol* 75, 435-443 (2002).
- [28] OLGAR T et al. Patient and staff doses for some complex X-Ray examinations, *J.Radiol.Prot.*29, 393-407 (2009).
- [29] O'CONNOR U et al. Occupational radiation dose to eyes from ERCP in light of the revised eyes lens dose limit from the ICRP, *Br J Radiol* 86(2013).
- [30] TSALAFOUTAS I A et al. Estimation of radiation doses to patients and surgeons from various fluoroscopically guided orthopaedic surgeons, *Radiat.Prot.Dosim* 128, 112-119 (2008).
- [31] SULIEMAN A et al, Radiation dose optimisation and risk estimation to patients and staff during hysterosalpingography, *Radiat.Prot.Dosim.* 128, 217-226 (2008).
- [32] VAÑO E et al. Eye Lens Exposure to Radiation in Interventional Suites: Caution Is Warranted, *Radiology* 248, 945-953 (2008).

- [33] DILLESEGER P. Analyse des postes de travail et détermination du zonage en neuroradiologie interventionnelle. Rapport de stage IRSN. Master Radioprotection Grenoble. (2010).
- [34] VANHAVERE F et al. Measurements of eyes lens doses in interventional and cardiology : final results of ORAMED project. Radiation Measurements 46, 1243-1247 (2011).
- [35] ANTIC V et al. Eye lens dosimetry in interventional cardiology: results of staff dose measurements and link to patient dose levels Radiat.Prot.Dosim 154, 276-284 (2013).
- [36] THEOCHAROPOULOS N et al. Occupational exposure in the electrophysiology laboratory: quantifying and minimizing radiation burden. Br. J. Radiol. 79, 644-651 (2006).
- [37] PAULSON E K et al. CT-Guided interventional procedures: technics, results and radiation exposure. Radiology 212, 673-681 (2001).
- [38] GAGNA G et al. Exposition radiologique de l'équipe opératoire au cours de curiethérapies de prostate par implants permanents d'iode-125. Radioprotection 46 (2), 189-208 (2011).
- [39] SUMMERS E C et al. Eye doses to staff in a nuclear medicine department. Nucl Med Commun. 33(5):476-480 (2012).
- [40] LEIDE-SVEGBORN S. External radiation exposure of personnel in nuclear medicine from ^{18}F , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and ^{131}I with special reference to fingers, eyes and thyroid. Rad. Prot. Dosim. 149, 196-203 (2012).
- [41] KOPEC R. et al. On the relationship between whole body, extremity and eye lens doses for medical staff in the preparation and application of radiopharmaceuticals in nuclear medicine. Radiat. Measurements 46(11):1295-1298 (2011).
- [42] http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Communiqués_et_dossiers_de_presse/Pages/20130723-Bilan_2012_expositions_professionnelles_rayonnements_ionisants.aspx
- [43] VAN SONSBEK R et al. Industrial Radiography. Technical Meeting on the The New Dose Limit for the Lens of the Eye - Implications and Implementation, Vienna, 2-4 October 2012.
- [44] HEBERT M. Prise en compte du risque d'exposition du cristallin dans les installations EDF. Congrès national de radioprotection SFRP, Bordeaux, 11-13 juin 2013.
- [45] DEVIN P et al. La dosimétrie du cristallin. Congrès national de radioprotection SFRP Bordeaux, 11-13 juin 2013.
- [46] Rapport DRPH n° 2011 - 11. Conséquences pratiques de l'abaissement de la limite de dose au cristallin pour les travailleurs (2011).
- [47] KOUKORAVA C et al. Study of the parameters affecting operator doses in interventional radiology using Monte Carlo simulations. Radiat. Meas. 46,1216-1222 (2011).
- [48] DAUER L T et al. Unprotected operator eye lens doses in oncologic interventional radiology are clinically significant: estimation from patient kerma-area-product data. J. Vasc Interv Radiol. 21:1859-1861 (2010).

- [49] VAÑO E et *al.* Influence of patient thickness and operation modes on occupational and patient doses in interventional cardiology. *Radiat. Prot. Dosimetry* 118, 325-330 (2006).
- [50] BORDY J M et *al.* Proposals for the type tests criteria and calibration conditions of passive eye lens dosimeters to be used in interventional cardiology and radiology workplaces *Radiat. Meas.* 46,1235-1238 (2011).
- [51] BEHRENS R et *al.* Dose conversion coefficients for photon exposure of the human eye lens *Phys. Med. Biol* 56, 415-437 (2011).
- [52] BEHRENS R et *al.* Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate? *Phys. Med. Biol.* 55 4047-4062 (2010).
- [53] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent and effective dose to workers for external exposure to low_LET radiation. NCRP Report No. 122, Bethesda, MD., NCRP (1995).
- [54] BILSKI P et *al.* The new *EYE-D™* dosimeter for measurements of $H_p(3)$ for medical staff. *Rad. Meas.* 46, 1239-1242 (2011).
- [55] VAÑO E et *al.* Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology. *Br J Radiol* 71 954-960 (1998).
- [56] KICKEN P J H. Dosimetry of occupationally exposed persons in diagnostic and interventional arteriography Part I, *Radiat. Prot. Dosimetry* 82, 93-103 (1999).
- [57] MORITAKE T et *al.* Dose Measurement on Both Patients and Operators during Neurointerventional Procedures using Photoluminescence Glass Dosimeters *American Journal of Neuroradiology* 29, 1910-1917 (2008).
- [58] KEMERINK G.J. et *al.* Patient and occupational dose staff in neurointerventional procedures. *Neuroradiology* (2002).
- [59] BOR D. Patient and staff doses in interventional neuroradiology *Radiation Protection Dosimetry* 1-7, (2005).
- [60] MARTIN C J. A review of radiology staff doses and dose monitoring requirements. *Radiat. Prot. Dosimetry* 136, 140-157 (2009).
- [61] FARAH J et *al.* A correlation study of eye lens dose and personal dose equivalent for interventional cardiologists. *Radiat. Prot. Dosimetry* 1-9 2013 (publication juillet 2013).
- [62] GUALDRINI G., FERRARI P. and TANNER R. Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutron from thermal to 15 MeV. *Radiat. Prot. Dosim.* (2013) doi:10.1093/rpd/cnt126.