



Disponible en ligne sur

ScienceDirect

www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte

www.em-consulte.com



Mise au point

Notre faux-ami le rayon X - Risques, évaluation, protection, amélioration des pratiques - État des lieux par le registre France- PCI



X-Ray, false friend of the interventional cardiologist - Risks, evaluation, quality improvement - Status report from France-PCI registry

Dr Matthieu Périer^{1,*}, Dr Gabriel Seret¹, Dr Jean François Morelle², Dr Nicolas Amabile³,
Dr Gérard Duheil⁴, Pr Jacques Monségu⁵, Dr Nicolas Durel⁶, Dr Vincent Tixier⁷,
Dr Benjamin Honton⁸, Dr Antoine Py⁹, Pr Gilles Barone-Rochette¹⁰, Dr Sylvain Chanseaux¹¹,
Dr Stéphane Rias¹², Dr Julien Adjedj¹³, Dr Ali Shararah¹⁴, Pr Pascal Motreff¹⁵,
Dr Grégoire Rangé¹⁶, Dr Hakim Benamer^{1,17,18}

¹ Service de cardiologie, Hôpital Foch, 40, rue Worth, 92150 Suresnes, France

² Service de cardiologie, Hôpital Privé Saint-Martin, 14050 Caen, France

³ Service de cardiologie, Institut Mutualiste Montsouris, 75014 Paris, France

⁴ Service de cardiologie, Clinique Bergouignan, 27000 Evreux, France

⁵ Service de cardiologie, Groupe Hospitalier Mutualiste de Grenoble, 38000 Grenoble, France

⁶ Service de cardiologie, Pôle santé République, 63050 Clermont Ferrand, France

⁷ Service de cardiologie, Centre Hospitalier Jacques-Lacarin, 03200 Vichy, France

⁸ Service de cardiologie, Clinique Pasteur, 31300 Toulouse, France

⁹ Service de cardiologie, Clinique de l'Europe, 80090 Amiens, France

¹⁰ Service de cardiologie, Centre Hospitalo-Universitaire de Grenoble, 38043 Grenoble, France

¹¹ Service de cardiologie, Centre Hospitalier de Montluçon, 03113 Montluçon, France

¹² Service de cardiologie, Centre Hospitalier Métropole Savoie, 73011 Chambéry, France

¹³ Service de cardiologie, Institut Arnault Tzanck, 06007 Saint-Laurent-du-Var, France

¹⁴ Service de cardiologie, Clinique Saint Joseph, 49800 Trélazé, France

¹⁵ Service de cardiologie, Centre hospitalo-universitaire Gabriel-Montpied, 58, rue Montalembert, 63000 Clermont-Ferrand, France

¹⁶ Service de cardiologie, Hôpitaux de Chartres, 4, rue Claude-Bernard 28630 Le Coudray, France

¹⁷ Institut Jacques Cartier, Institut cardiovasculaire Paris Sud (ICPS) Ramsay Générale de santé, 6, avenue du Noyer-Lambert, 91300 Massy, France

¹⁸ Membre du Collège de Médecine des Hôpitaux de Paris, France

IN F O A R T I C L E

Historique de l'article :

Reçu le 15 septembre 2021

Accepté le 2 octobre 2021

Disponible sur Internet le 31 Octobre 2021

Mots clés :

revue de littérature
cardiologie interventionnelle
irradiation
amélioration des pratiques
radioprotection
cathétérisme cardiaque
registre France-PCI

R É S U M É

Le rayon X est l'allié indispensable de l'angioplasticien, mais l'irradiation du patient et du personnel soignant en salle peut être pourvoyeuse de complications radio-induites (radiodermite, cataracte, tumeur cérébrale, etc.). L'exposition à des doses élevées ou répétées expose à un risque de survenue d'effets déterministes. Et, l'opérateur, et le patient encourent un risque aléatoire d'apparition d'effets stochastiques. Ces risques sont intimement liés à la dose absorbée. Dans ce contexte, la radioprotection constitue un enjeu de santé publique. Elle repose sur le principe ALARA qui consiste à optimiser la dose, c'est-à-dire à utiliser autant de rayonnement utile pour fournir une imagerie adéquate mais pas plus de rayonnement que nécessaire. Ainsi, les mesures et principes de radioprotection, rappelés dans cet article, doivent être maîtrisés par tout cardiologue interventionnel.

Dans une démarche d'amélioration des pratiques, il paraît indispensable d'évaluer et comparer les données dosimétriques liées aux procédures de cardiologie interventionnelle. Le registre France-PCI a permis de recueillir, sur l'année 2020, les données dosimétriques de 55 783 procédures coronaires menées dans 30 centres français. En moyenne, une coronarographie diagnostique nécessitait un temps de scopie de 4,4 minutes, un PDS de 1 767cGy.Cm2 et un Air Kerma de 257 Gy. Ces doses sont doublées voire triplées pour les procédures d'angioplasties. Enfin les traitements des occlusions chroniques apparaissaient comme responsables d'une irradiation plus de deux fois supérieures aux angioplasties conventionnelles. On constate par ailleurs une importante disparité des doses moyennes par procédure selon les centres considérés.

© 2021 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Auteur correspondant : Dr Matthieu Périer Adresse
E-mail address: perier.matthieu@yahoo.fr (D.M. Périer).

A B S T R A C T

Key-words :
 literature review
 interventional cardiology
 radiation exposure
 quality improvement
 radiation protection
 cardiac catheterization
 France-PCI registry

Although indispensable, radiation exposure during cardiac catheterization procedures can cause specific radiation-induced diseases. These affect the patient but also the interventional cardiologist. Exposure to high or repeated radiation doses causes deterministic effects. Moreover, even low-dose exposure, especially when repeated, produces a risk of stochastic effects. In that respect, it is crucial to improve the radiation safety of cardiac angiography and interventions, to promote radiation protection and to maintain this exposure « As Low As Reasonably Achievable ». Thus, there is a necessity to spread knowledge about safety standards and recommendations to reduce the dose among interventionalists.

Data collection and comparison of practices are precious to this quality improvement process. For the year 2020, France-PCI registry had collected dosimetric data related to 55 783 coronary angiographic and interventional procedures from 30 centers in France. Mean fluoroscopy time was 4,4 minutes for diagnostic procedures. Mean PDS was 1 767cGy.Cm2 and mean Air Kerma de 257Gy. Coronary percutaneous angioplasty procedures were related to approximately two to three times higher mean exposures. Mean exposure related to chronic coronary total occlusion treatment procedures was also two times higher than exposure related to non-CTO interventions. These data also highlighted wide disparities between centers.

  2021 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

1. Introduction

La « découverte » du rayon X par le physicien allemand Wilhelm R ntgen et la réalisation de la première radiographie de la main de son  pouse Anna Bertha R tgen en 1885, suscitent rapidement l'intérêt de la communauté médicale. Les propriétés particulières de ce rayonnement, à savoir son absorption relative par la matière en fonction de sa densité et sa capacité à impressionner une plaque photographique, inspirent alors de multiples applications dans le domaine de l'imagerie médicale pour le diagnostic des maladies, puis dans le domaine de la radiothérapie et de la radiologie interventionnelle pour leur traitement. Il ne faudra attendre qu'une année pour voir l'ouverture du premier cabinet de radiologie dentaire en Allemagne, et, en France, la première installation radioscopique voit le jour en 1897, à l'hôpital Tenon, destinée à effectuer des radiographies thoraciques et des poumons à des fins de détection de lésions tuberculeuses. Très vite, ces pionniers de la radiologie réalisent que l'exposition à ce rayonnement ionisant n'est pas anodine et en rapportent les premiers effets néfastes déterministes sur l'homme. Walkhoff décrit en 1895 l'apparition d'une alopecie au décours d'une exposition de plus de 25 minutes pour la réalisation d'une radiographie des molaires réalisée sur sa propre personne.

Plus d'un siècle plus tard, le raffinement des techniques d'émission et de détection des rayons X, utilisant des systèmes de visualisation en temps réel par des amplificateurs de brillance montés sur des arceaux mobiles, a permis à la coronarographie de rester l'examen de référence de l'exploration des artères coronaires et a participé à l'essor de l'angioplastie coronaire percutanée, permettant le traitement de lésions de plus en plus complexes. Les procédures de cardiologie interventionnelle constituent en radiologie parmi les procédures les plus irradiantes à la fois pour les patients et pour les opérateurs. Allié indispensable de l'angioplasticien, le rayonnement X reste à l'origine de complications iatrogènes. La limitation et le contrôle de la dose sont un enjeu quotidien qui doit être évalué et intégré à la balance bénéfice-risque de chaque procédure. Parall mement à la question de la radioprotection du patient, l'opérateur et le personnel paramédical subissent des expositions répétées à ce rayonnement ionisant et doivent faire l'objet d'une protection attentive.

2. Effets biologiques des rayonnements ionisants

2.1. Dommages à l'échelle moléculaire et cellulaire

Certains rayonnements dont les rayons X sont dits ionisants car ils émettent des rayons d'énergies suffisantes pour transformer les

atomes qu'ils traversent en ions. Les rayonnements ionisants exercent une action sur les tissus humains par deux mécanismes:

- un effet direct : l'ionisation d'un atome de macromolécule, à l'origine de sa recombinaison, modifiant sa structure chimique primaire.
- un effet indirect par radiolyse de l'eau : l'ionisation des molécules d'eau et d'oxygène entraînant la formation de radicaux libres, eux-mêmes responsables de modifications structurales de l'ADN.

L'ionisation des noyaux cellulaires et de l'ADN peuvent entraîner des anomalies de codage génétique, des mutations, des cancers, des leucémies, des anomalies héréditaires (sur les cellules germinatives), la perte de la capacité cellulaire de prolifération et/ou la mort cellulaire. Cette dernière survient généralement au moment de la mitose, et donc à plus ou moins brève échéance selon la vitesse de renouvellement de la cellule irradiée. Ceci explique le caractère retardé de certains effets radio-induits notamment sur les cellules à division lente (neurones, myocytes, etc.). Par ailleurs, on distingue les effets déterministes (ou obligatoires) des effets stochastiques (ou aléatoires ou retardés).

2.2. Les effets cliniques déterministes

Ils sont liés aux morts cellulaires immédiates ou différées. Même les doses les plus faibles sont responsables de morts cellulaires, cependant il existe un seuil à partir duquel elles deviennent suffisamment nombreuses pour être responsables d'altérations du tissu ou de l'organe exposé. [1] Ces effets apparaissent de manière systématique à partir d'une certaine dose. En fonction de la dose et selon l'organe touché, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (comme pour la radiodermite aiguë)   plusieurs mois (radiodermite chronique). Des effets secondaires peuvent même être observés des années après une irradiation (fibrose, athérosclérose, cataracte). Ils sont d'autant plus graves que la dose est importante.

2.3. Les effets cliniques stochastiques

Si les dommages subis par la cellule irradiée sont modérés, elle peut survivre et conserver sa capacité de prolifération. Cependant les mutations dont elle peut être porteuse peuvent être à l'origine de cancers ou leucémies, de malformations dans la descendance pour les cellules qui interviennent dans la reproduction (spermatozo ides, ovocytes, etc.). Ces effets apparaissent des années après l'exposition et leur apparition est aléatoire. Mais leur probabilité d'apparition dépend de la dose de rayonnement reçue. On notera qu'il n'existe pas

de particularité signant la caractéristique radio-induite de telles pathologies qui peuvent aussi être liées à des facteurs génétiques ou environnementaux. Leur imputabilité à l'exposition aux rayons est toujours incertaine et discutable.

3. Exposition en salle de cathétérisme

3.1. Les sources de rayonnement

Deux sources principales de rayonnement, interdépendantes, coexistent en salle de cathétérisme : le rayonnement direct et le rayonnement diffusé. Le rayonnement direct ou primaire est de loin le plus intense. Il est issu du tube radiogène et est émis en direction du patient et de la zone d'intérêt puisqu'il sert à la formation de l'image. Le rayonnement diffusé ou secondaire est issu des objets irradiés par le rayon primaire. Il est constitué de photons apparus lors d'interactions (effet Compton notamment) entre le rayonnement primaire et les particules du milieu traversé. En cardiologie interventionnelle, il provient essentiellement du patient. Les photons diffusés ont une énergie moindre que le rayonnement primaire. Mais ils ont une direction différente, sont responsables de l'irradiation en dehors des limites géométriques du faisceau primaire et du rayonnement ambiant dans la salle d'examen, contribuant à la majorité de l'exposition du personnel soignant présent en salle. Le maximum de ce rayonnement secondaire se trouve du côté du tube expliquant l'intérêt de positionner ce dernier sous la table tout au long des procédures. Cette pratique permet également de diminuer l'incidence d'une troisième source, le rayonnement de fuite de gaine, qui correspond au rayonnement issu du tube radiogène qui traverse la gaine du générateur en dehors du collimateur.

Deux notions de physique des rayons vont guider la plupart des mesures de contrôle de l'exposition en salle de cathétérisme : la dose est inversement proportionnelle au carré de la distance de la source et la dose est proportionnelle au temps d'exposition.

3.2. Mesures de l'exposition

3.2.1. Les unités de mesure

L'effet des rayonnements dépend en premier lieu de l'énergie ionisante reçue physiquement par unité de masse, d'où le concept de dose. Deux unités principales sont utilisées pour la mesure de la radioactivité en salle de cathétérisme : le Gray (Gy) et le Sievert (Sv).

Le Gray est utilisé pour mesurer la quantité d'énergie délivrée par un rayonnement à chaque kilogramme de tissu qu'il traverse. Il s'agit de l'unité de la dose absorbée (D). Un Gray représente l'énergie d'un rayonnement ionisant apportant une énergie d'un Joule à un milieu homogène d'un kilogramme. Le Gray est notamment utilisé pour apprécier les effets déterministes de fortes irradiations.

Le Sievert a la même définition physique que le gray, et correspond à un Joule par kilogramme. Mais il est pondéré selon le type de rayonnement, des doses reçues par l'organisme et de la sensibilité spécifique des tissus traversés. Lors d'une irradiation localisée, le potentiel mutagène n'a pas la même gravité selon qu'elle concerne un organe dont les cellules se reproduisent lentement (comme la peau ou l'os qui ont un facteur de pondération de 0,01) ou rapidement (comme le poumon ou la moelle osseuse qui ont un facteur de pondération de 0,12). Pour le thorax, on estime ce facteur à 0,2. Ces deux facteurs de pondération tissulaire et de rayonnement sont calculés par la Commission internationale de protection radiologique et évoluent au fil de l'apparition de nouvelles données scientifiques ou épidémiologiques. Ces facteurs de pondération permettent d'exprimer des valeurs fondées non plus sur la seule énergie délivrée, mais sur ses conséquences pour la santé du sujet exposé. Le Sievert donc l'unité la plus adaptée pour l'évaluation de l'impact des rayonnements sur l'homme et pour évaluer le risque de survenue d'effets stochastiques. C'est l'unité utilisée pour exprimer la dose équivalente

(H) et la dose efficace (E). La dose équivalente représente la dose absorbée par un tissu ou organe donné, pondéré selon le type de rayonnement. Le facteur de pondération du rayon X est de 1. La dose efficace prend également en compte la différence de sensibilité des différents tissus.

3.2.2. Les principaux indicateurs dosimétriques en salle de cathétérisme cardiaque [2]

3.2.2.1. *Air Kerma (AK)*. Exprimée en Gray, elle correspond à la dose délivrée par le tube à rayons X au niveau du Point de référence interventionnel (PRI) situé par convention à 15 cm sous l'isocentre de l'arc et qui est considérée comme représentative du point d'entrée du faisceau sur la peau du patient. Il est corrélé au risque cutané. L'interprétation de sa valeur a des limites : il s'agit d'une dose calculée qui ne tient pas en compte la variation des incidences du faisceau sur le patient, ni les variations de hauteur de la table et considère toutes les incidences comme superposées et à distance constante.

3.2.2.2. *Produit Dose Surface (PDS)*. Il s'agit quant à elle d'une dose réellement mesurée via une chambre d'ionisation en sortie de tube qui considère la surface du champ d'irradiation et s'exprime en Gy.cm². Le PDS est corrélé au risque stochastique. Il existe une relation de proportionnalité entre le PDS et la dose efficace : des facteurs de conversion globaux, définis en fonction de la zone anatomique exposée, permettent le calcul de la dose efficace à partir du PDS. Ces facteurs sont publiés dans le rapport de la CIPR. Cependant, le PDS est indépendant de la distance entre le patient et la source alors que la dose comme la surface varient avec le carré de la distance. L'arrêté du 22 septembre 2006 stipule que les informations dosimétriques (dont le PDS exprimé en Gy.cm² ou en μ Gy.m²) doivent figurer dans tout compte rendu d'acte médical utilisant les rayonnements ionisants.

3.2.2.3. *Le temps de scopie*. La dose reçue est proportionnelle au temps d'exposition, ainsi le temps de radioscopie (exprimée en secondes) constitue un autre indicateur utile d'exposition et de bonnes pratiques.

4. Niveaux d'exposition liée aux procédures de cardiologie interventionnelle

4.1. Spécificités des procédures de cardiologie interventionnelle

Le cardiologue interventionnel est le spécialiste le plus exposé aux radiations ionisantes, que ce soit comparativement aux autres spécialités de radiologie interventionnelle ou au personnel travaillant en médecine nucléaire ou en radiothérapie. La dose efficace reçue par intervention avait été estimée en 2008 à entre 0,02 et 38 mSv pour les procédures diagnostiques et 0,17 à 31,2 microSv pour les actes d'angioplastie. [3] Cette importante variabilité s'explique par l'inconstance de l'utilisation des équipements de protection et par la diversité des procédures considérées. Sur l'ensemble de sa carrière son exposition a été estimée de 50 mSv-200 mSv soit l'équivalent de 2 500 à 10 000 radiographies thoraciques. Plusieurs facteurs expliquent cette surexposition :

- En premier lieu, la proximité de l'opérateur des sources de rayonnement primaire (le tube) et secondaire (principalement le patient). On retrouve un facteur d'exposition pour le cardiologue 1 000 fois plus élevé que pour le personnel travaillant dans la salle de contrôle. La démocratisation de la voie radiale, devenue l'abord de la grande majorité des procédures amplifie ce phénomène. [4,5]
- L'intensité importante de la source de rayonnement (inférieure à la radiothérapie mais supérieure à la médecine nucléaire)

- L'augmentation du nombre d'actes par opérateur, de leur complexité et donc de leur durée moyenne.
- L'usage inconstant des dispositifs de protection.

Par ailleurs, cette exposition n'est ni uniforme ni symétrique et ces niveaux d'exposition globale ne reflètent pas les risques liés à l'exposition particulière de certains organes à risque et mal protégés comme la peau, la cornée ou l'encéphale.

4.2. Niveaux de référence

Le code de la santé publique prévoit que des « niveaux de référence diagnostiques » (NRD) soient établis pour les actes présentant un enjeu de radioprotection. Il se définit par le 75^e centile de la distribution des indicateurs dosimétriques d'un panel représentatif d'examens. Ce sont des indicateurs de la qualité des pratiques destinés à identifier les examens sur lesquels doivent porter prioritairement les efforts d'optimisation. Ils n'ont de sens que pour évaluer une pratique moyenne (à partir de groupes de patients) et n'ont pas vocation à être comparés à l'exposition individuelle d'un patient. C'est l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) qui est chargé de collecter au niveau national les données dosimétriques en vue de la mise à jour périodique des NRD.

L'IRSN indique les NRD suivants pour les coronarographies : 38 Gy.cm2 de PDS et 6 minutes de temps de scopie. Pour les angioplasties (hors désobstruction d'occlusions chroniques), les NRD sont fixés à 80 Gy.cm2 de PDS et 15 minutes de temps de scopie.

La valeur de guide diagnostique ou VGD constitue un indicateur de dose apparenté. Il s'agit de la médiane des données dosimétriques transmises à l'IRSN. Les VGD pour les coronarographie sont de 21 Gy.cm2 de PDS et de 4 minutes de temps de scopie. Les VGD pour les angioplasties sont de 45 Gy.cm2 pour le PDS et de 10 minutes pour le temps de scopie.

4.3. Données issues du registre France-PCI

La détermination de ces niveaux de référence nécessite de disposer d'informations dosimétriques à l'échelle nationale pour les procédures de cardiologie interventionnelle. Dans cette optique, les registres recueillant de manière systématique de tels indicateurs pourraient jouer un rôle central.

France-PCI est un registre national créé en 2014 par l'association CRAC et en plein essor avec la participation actuelle de près de 25 % des centres français. Il recense de manière systématique

les activités de coronarographies et d'angioplasties coronaires. Parmi les variables recueillies figurent les données dosimétriques des examens, considérés comme des indicateurs de qualité : PDS, Air Kerma et temps de scopie. Il permet l'émission de rapports annuels permettant aux centres participants de visualiser ces données en temps réel et de comparer leurs performances à la moyenne nationale.

L'analyse des données issues des 55 783 procédures (32192 procédures purement diagnostiques, et 23 592 procédures comprenant une angioplastie coronaire, dont 979 comprenant une angioplastie de CTO) incluses sur l'année 2020 au sein de 29 centres participants l'année en question permet de fournir un état des lieux précis des pratiques en France l'an passé.

La figure 1 représente les moyennes de l'année 2020 par procédure des trois données dosimétriques (temps de scopie, PDS et Air Kerma), classées par type de procédure. Sur l'année 2020, une coronarographie diagnostique nécessitait un temps de scopie de 4,4 minutes, le PDS moyen associé était de 1 767 cGy.cm2 et l'Air Kerma moyen associé était de 257 Gy. On observe une majoration modérée de l'irradiation moyenne lors du recours à des mesures de FFR pour compléter ces examens diagnostiques avec des moyennes par examen de 7,4 minutes de temps de scopie, 2 482cGy.cm2 de PDS et 391 Gy d'Air Kerma. Ces données dosimétriques moyennes sont doublées voire triplées pour les procédures d'angioplasties. Lorsque le même examen comprend une coronarographie et une ou plusieurs angioplasties dans le même temps, le temps de scopie moyen était de 12,4 minutes, le PDS moyen était de 3 831cGy.cm2 et l'Air Kerma moyen était de 659 Gy. Lorsque le bilan diagnostique était pré-établi et que l'examen consistait uniquement en un geste d'angioplastie, le temps de scopie moyen était de 14,0 minutes, le PDS moyen était de 3 982cGy.cm2 et l'Air Kerma moyen était de 747 Gy. Les procédures d'angioplasties ad-hoc sont donc associées à des niveaux d'irradiation moindres que les angioplasties programmées. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces dernières visent généralement le traitement de lésions plus complexes, qui nécessitent des procédures plus longues. Enfin les traitements des occlusions chroniques apparaissent comme responsables d'une irradiation moyenne par procédure plus de deux fois supérieure à celles destinées aux traitements des lésions tout-venant avec un temps de scopie moyen de 31,2 minutes, un PDS moyen de 8 002cGy.cm2 et un Air Kerma moyen de 1 507 Gy.

La figure 2 représente l'évolution sur les 4 dernières années des moyennes des trois indicateurs dosimétriques. On constate une stabilité des temps de scopie moyens entre les années 2017

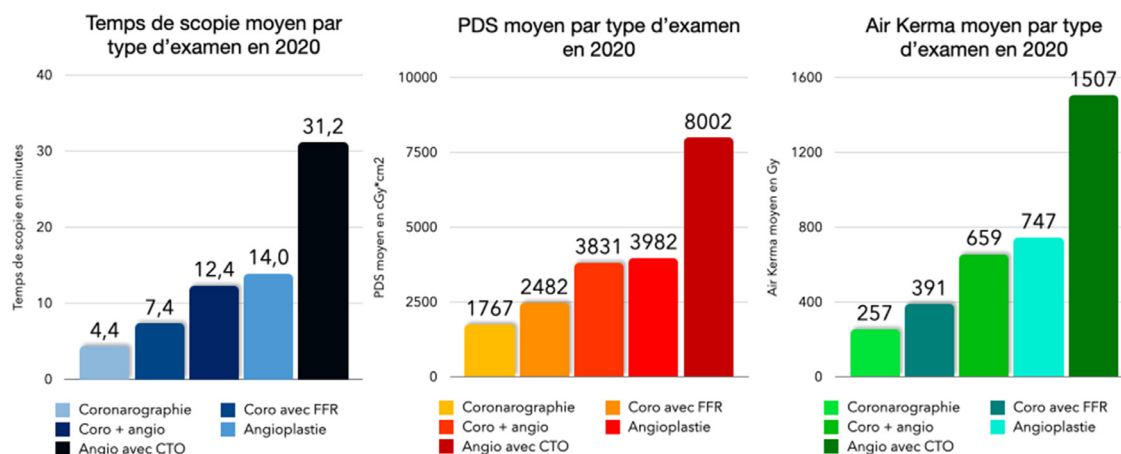


Figure 1. Moyennes par procédure des temps de scopie (à gauche), PDS (au centre), et Air Kerma (à droite), par type de procédure, sur l'année 2020 - Valeurs issues des données du registre France-PCI.

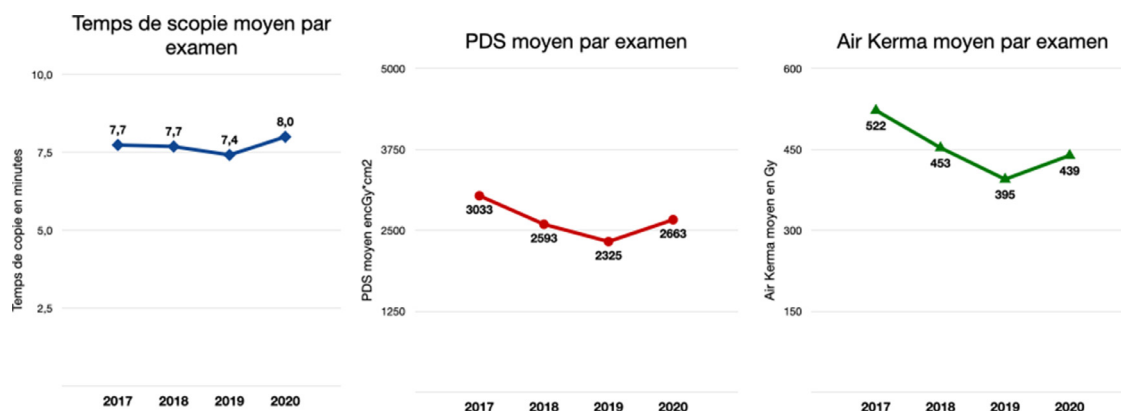


Figure 2. Évolution sur les 4 dernières années des moyennes par examen des temps de scopie (à gauche), PDS (au centre), et Air Kerma (à droite), tout types d'examen confondus - Valeurs issues des données du registre France-PCI.

et 2019 et une baisse parallèle des PDS et Air Kerma moyens, témoignant d'une possible amélioration des pratiques ou d'une sophistication du matériel de radioscopie utilisé sur cette période. Sur l'année 2020, on observe une réascension notable des niveaux d'exposition moyens des patients inclus dans le registre. Comme illustré par la [figure 3](#), une tendance similaire existe concernant les procédures de désobstruction des occlusions totales chroniques.

Différentes hypothèses pourraient être avancées pour expliquer ce phénomène :

- La tendance à la complexification moyenne des procédures.
- Un relâchement dans l'application des mesures pratiques de radioprotection par les opérateurs, dont les habitudes de travail ont été perturbées par la gestion du risque de contamination liée à la pandémie de COVID 19.
- L'arrivée de nouveaux centres dans le registre, dont les niveaux d'exposition moyens sont plus élevés.

En effet, comme l'illustre la [figure 4](#), il existe une grande variabilité des moyennes des doses selon le centre considéré. Des inégalités inter-centres d'application des mesures pratiques de réduction de dose, d'équipements de radioscopie, de recrutement des patients (tant en termes de gravité clinique que de complexité des lésions coronaires) et de fréquence de recours à la FFR ou à l'imagerie endocoronaire pourraient concourir à cette importante disparité.

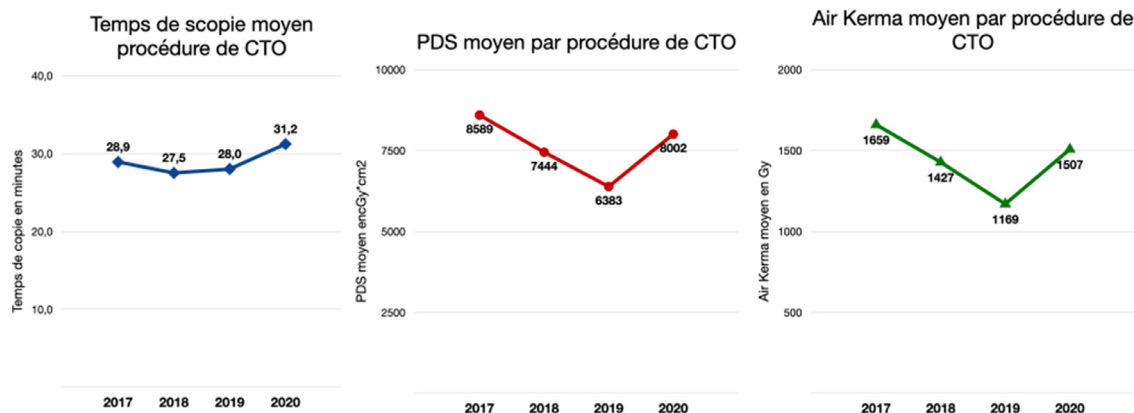


Figure 3. Évolution sur les 4 dernières années des moyennes par examen des temps de scopie (à gauche), PDS (au centre) et Air Kerma (à droite), pour les examens comprenant une angioplastie de CTO - Valeurs issues des données du registre France-PCI.

5. Les pathologies radio-induites liées à la cardiologie interventionnelle

5.1. Tumeurs cérébrales

Les pathologies imputables à l'exposition répétée subie par les opérateurs au cours de leur carrière sont diverses et leur spectre de leur gravité est très large. Elles concernent les organes peu ou mal protégés : la peau, les mains, les yeux, et l'encéphale.

Un débat animé est né, à la fin des années 1990, autour de quatre cas rapportés de tumeur cérébrale diagnostiqués chez des cardiologues interventionnels français et canadiens et du potentiel lien de causalité entre leur pathologie et leur exposition professionnelle. Des études épidémiologiques ont démontré un lien statistique entre l'exposition aux rayonnements ionisants et la survenue de ce type de cancers considérés comme pouvant être radio-induits. [6] Le lien de causalité avec l'exposition professionnelle n'est pas prouvé et nécessiterait la conduite d'une étude aux effectifs et à la durée de suivi exubérants compte tenu de la très faible incidence de ces pathologies.

Néanmoins, des preuves indirectes entretiennent une certaine crainte dans la communauté vis-à-vis de ces complications très rares mais aux conséquences dramatiques. Roguin et coll. ont constitué en 2015 une cohorte de 31 cas de tumeurs cérébrales chez des sujets exposés à une exposition professionnelle significative dont 21 concernait des angioplasticiens, 2 des électrophysiologistes et 8 des radiologues interventionnels. Ils dénombrent 17 cas (55 %) de glioblastomes multiformes, 2 cas (7 %) d'astrocytomes et 5 cas (16 %) de

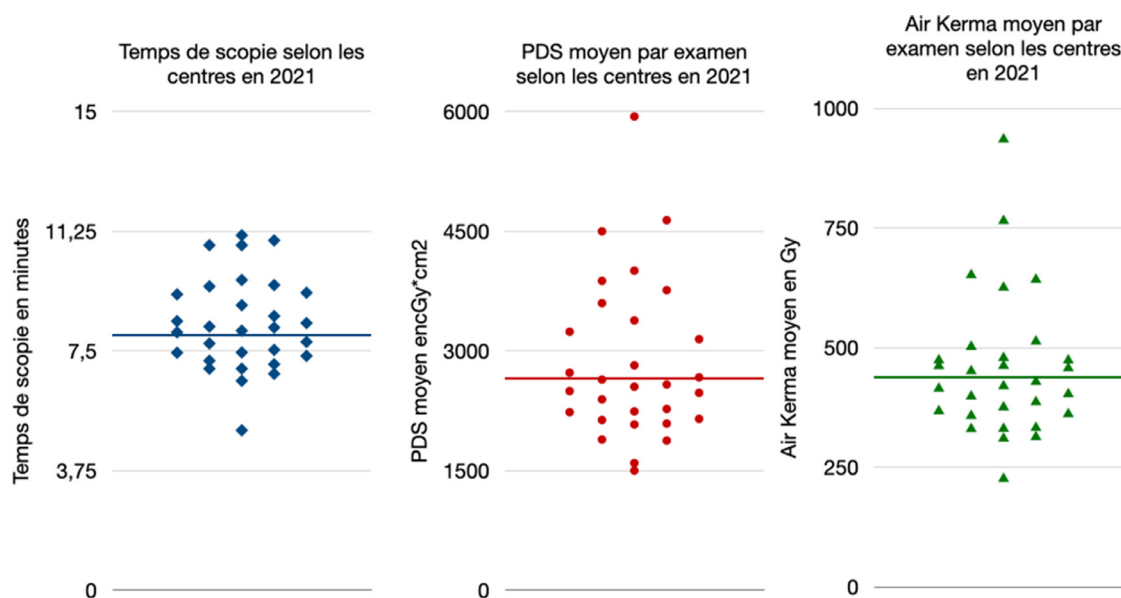


Figure 4. Répartition selon les centres des moyennes par examen des temps de scopie (à gauche), PDS (au centre), et Air Kerma (à droite), tout type d'examen confondus, sur l'année 2020 - Valeurs issues des données du registre France-PCI.

méningiomes. [7] Parmi ces tumeurs 85 % concernaient l'hémisphère cérébral gauche, or l'étude BRAIN a démontré que l'hémisphère gauche des opérateurs est exposé à des doses 4,7 fois supérieures à celles reçues par l'hémisphère droit, suggérant une possible relation causale. [8]

5.2. Déclin cognitif

Il a également été suggéré que l'exposition chronique aux rayons puisse affecter les fonctions cognitives et être responsable d'un vieillissement cérébral prématuré. Une étude comparant les performances cognitives de cardiologues interventionnels et non interventionnels a observé des scores péjoratifs dans le groupe des interventionnels pour les tests explorant des fonctions gouvernées par l'hémisphère gauche telles que la mémoire verbale à long terme, l'aisance verbale ou la mémoire visuelle à court terme. [9]

5.3. Remaniements chromosomiques

Andreassi et coll., en 2005, se sont attelés à comparer l'incidence d'anomalies chromosomiques dans les caryotypes de trente cardiologues interventionnels à un groupe de 30 cliniciens et observent une majoration de 22 % des anomalies chromosomiques dans le groupe exposé aux rayonnements ainsi qu'une corrélation aux nombres d'années de travail dans le groupe exposé. [10] L'exposition chronique entraînerait des aberrations chromosomiques pouvant être considérées comme des anomalies précancéreuses.

5.4. Effet cardiovasculaire

Les hautes doses de rayonnement ionisant (>0,5 Gy) sont responsables de l'apparition de lésions vasculaires avec réduction des capillaires et développement d'athérosclérose. Les conséquences cardiovasculaires des petites doses sont débattues. Dans une analyse portant sur 42.000 professionnels exposés à long terme à de petites doses, Mc Geoghegan et al. ont mis en évidence une association entre mortalité par causes cardiovasculaires et exposition aux rayonnements. [11] Il a également été objectivé une majoration de l'épaisseur intima-média carotidienne dans un groupe de cardiologues interventionnels comparativement à un groupe contrôle, avec une prédominance de l'épaississement au niveau de l'artère carotide gauche. Ce

marqueur de risque cardiovasculaire était plus important encore chez les sujets rapportant de hauts volumes de procédures. [12]

5.5. Cataracte

Le cristallin est un organe particulièrement radio-sensible et souvent insuffisamment protégé. La cataracte précoce sous-capsulaire postérieure est un effet stochastique reconnu du rayonnement ionisant. L'étude française O'CLOC avait montré, en 2012, une incidence 3,9 fois supérieure de la présence d'opacités sous-capsulaires postérieures dans un groupe de 106 cardiologues interventionnels comparativement à un groupe contrôle (17 % vs. 5 %, $p=0.006$). Par ailleurs, plus de 28 % des coronarographistes participants avaient déjà dépassé le seuil annuel réglementaire d'exposition au cristallin. [13]

5.6. Radiodermite

Le cardiologue est également exposé à un risque d'effet déterministe sur la peau en particulier sur les zones non protégées par les dispositifs de protection individuels, à savoir les mains susceptibles d'entrer dans le champ d'étude et de traverser le faisceau primaire et les jambes au niveau desquelles le rayonnement diffusé est le plus intense. Le seuil théorique d'apparition de la dermatite radique se situe à 2 Gy et des doses entre 2 Gy et 10 Gy exposent au risque de lésions érythémateuses, de desquamations et de dépilations. [14] En réalité, pour la majorité des individus aucune lésion n'est visible en dessous d'une dose de 5 Gy, jamais atteinte en pratique en dehors de situations accidentelles.

Si les cas de radiodermite chez les opérateurs relèvent de l'exception, les patients bénéficiant de procédures longues et/ou répétées sont plus fréquemment atteints. On distingue les radiodermites aiguës qui surviennent dans les jours ou semaines suivant l'irradiation et les effets à long terme, les radiodermites chroniques qui peuvent survenir des mois voire des années plus tard, sans lien avec la gravité des lésions aiguës. Typiquement ces lésions apparaissent dans le dos et restent souvent méconnues des patients et des cliniciens. [15]

Leur incidence exacte est méconnue mais les cas cliniques de lésions radio-induites, aux conséquences fonctionnelles et esthétiques parfois dramatiques, apparues secondairement à des procédures d'angioplasties coronaires sont nombreuses. Guesnier-

Dopagne et coll. ont identifié, parmi plus de 55 000 procédures guidées par fluoroscopie entre 2010 et 2016, 359 sujets à risque d'avoir développé des lésions cutanées chroniques induites par les rayons (par exemple Air Kerma > 5 Gy, PDS > 500 Gy.cm², temps de scopie > 60 minutes). Parmi les patients de ce groupe ayant pu être réexaminés à distance des examens irradiants (en moyenne à 31,2 mois), 8,8 % présentaient des lésions de radiodermite chronique et 20,9 % avaient présenté des signes de radiodermite aiguë. Les facteurs de risque associés à la survenue de ces lésions cutanées étaient l'IMC, le PDS et l'Air Kerma. [16]

6. La radioprotection

6.1. Concept de radioprotection

La radioprotection recouvre l'ensemble des mesures prises pour assurer la protection de l'homme et de son environnement contre les effets des rayonnements ionisants. Initialement basée uniquement sur un principe de limitation, guidée par la constatation des effets déterministes, elle repose depuis la seconde moitié du XX^e siècle sur les principes de précaution et d'optimisation, incarnés par le principe ALARA, acronyme pour « as low as reasonably achievable », en français « aussi bas que raisonnablement possible ». Cette démarche consiste à optimiser la dose de rayonnement, c'est-à-dire d'utiliser autant de rayonnement utile pour fournir une imagerie adéquate pour l'orientation, le diagnostic et l'angioplastie le cas échéant, mais pas plus de rayonnement que nécessaire.

Les études épidémiologiques menées sur près de 90 000 survivants des bombardements d'Hiroshima et Nagasaki ont montré avec certitude que le risque de cancer augmente chez les personnes ayant reçu une dose de rayonnements ionisants supérieure à 100 mSv de manière significative. En deçà de 100 mSv, les études n'ont pas établi de façon indiscutable l'existence d'une relation entre dose de rayonnements et risque de cancers notamment en raison des incertitudes qu'accompagnent ce type d'étude. Par principe de précaution, les doctrines actuelles de radioprotection reposent sur le concept de « relation linéaire sans seuil » entre la dose reçue et l'excès de risque de cancer. Cette relation linéaire sans seuil n'est pas scientifiquement démontrée à des niveaux d'exposition très faibles mais résulte de l'hypothèse de l'extension aux faibles doses d'une linéarité constatée à des niveaux plus élevés. [17,18]

La radioprotection est identifiée comme un véritable enjeu de santé publique par les autorités, qui ont intégré le principe ALARA au code de santé publique français en les termes suivants extraits de l'article L-1333-1 : « l'exposition des personnes aux rayonnements ionisants [...] doit être maintenue au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre, compte tenu de l'état des techniques, des facteurs économiques et sociaux et, le cas échéant, de l'objectif médical recherché ». Il existe également une implication forte de la Commission Européenne qui a abouti en 1991 à la création d'un réseau ALARA européen.

6.2. Radioprotection du patient

Dans la pratique quotidienne, la radioprotection du patient repose sur l'application de trois principes : la justification, l'optimisation et la limitation.

Tout examen impliquant une exposition du patient à un rayonnement ionisant doit faire l'objet d'un questionnement sur sa justification. Il est nécessaire de considérer certaines particularités cliniques propres au patient (par exemple son poids qui est un facteur influençant fortement la dose délivrée ou la grossesse), le bénéfice attendu de la procédure, les éventuelles alternatives diagnostiques ou thérapeutiques non irradiantes. Il est indispensable de considérer à cette étape les procédures irradiantes subies précédemment par le patient (coroscanner, scintigraphie myocardique, examens extra-

cardiologiques, et surtout procédures d'angioplastie précédentes qui conduisent à l'exposition des mêmes zones cutanées) pour limiter l'accumulation des doses, qui peut être approchée par l'analyse des rapports de doses. Le risque lié à l'irradiation est souvent peu considéré dans les démarches diagnostiques et thérapeutiques des cardiologues qui fondent leur pratique sur leurs habitudes, leur expertise personnelle et sur la disponibilité des examens.

Le principe d'optimisation consiste à user de l'exposition minimale nécessaire à l'obtention du bénéfice clinique attendu par la procédure. L'équipement radiologique fourni par les constructeurs, son paramétrage, l'utilisation qu'en fait l'opérateur sont des leviers permettant l'optimisation des doses délivrées. Les appareils d'angiographie dont sont équipées les salles de cathétérisme actuelles comprennent des systèmes adaptant les paramètres d'exposition pour maintenir une qualité d'image à un niveau pré-établi tout au long des procédures. Ainsi les éventuelles dégradations de qualité d'image seront compensées par une augmentation de la dose délivrée au patient. Il est donc primordial pour l'opérateur de maîtriser les techniques d'optimisation de l'image car elles résultent en une réduction de la dose. Un comité d'expert du GACCI et de la SFC ont élaboré un Guide des bonnes pratiques de radioprotection du patient en cardiologie interventionnelle. [19] Ce document pratique est disponible en ligne depuis 2015 et permet d'appréhender, de sensibiliser, et d'informer les praticiens sur les méthodes permettant une diminution de dose et une optimisation de la qualité d'image en vue d'une amélioration de la qualité des soins et de la sécurité des patients et du personnel soignant. On peut rappeler les principaux conseils pratiques en vue d'obtenir une réduction des doses délivrées :

- L'acquisition des images en graphie nécessite un signal plus élevé et une dose plus importante qu'une image en scopie. À durée égale une séquence en graphie sera responsable d'une dose 50 fois supérieure à une séquence en scopie, son utilisation doit être limitée au minimum nécessaire.
- Préférer les modes de scopie pulsée, la dose étant proportionnelle à la cadence de l'image.
- Exploiter les dernières images de scopie pour éviter une graphie inutile.
- Réduire la cadence des images. Une cadence de 7,5 images/s est généralement suffisante, les cadences supérieures doivent être réservées aux situations dans lesquelles l'analyse de l'angiographie est complexe ou lorsque le rythme cardiaque du patient est élevé.
- Utiliser les diaphragmes pour réduire la zone d'exploration à la zone d'intérêt et limiter la surface d'entrée du faisceau primaire. La région anatomique explorée doit être strictement limitée à la zone d'intérêt clinique. Cela permet de réduire la dose efficace au patient et de limiter le diffusé et donc d'améliorer le contraste de l'image.
- Éloigner au maximum le tube du point d'entrée à la peau du patient permet de diminuer la dose à la peau (la dose diminue suivant le carré de la distance) tout en maintenant une dose au récepteur et donc une qualité d'image constante.
- Rapprocher au maximum le récepteur du foyer et du patient. Par régulation le système maintient une dose quasi constante au niveau du récepteur. Si la distance foyer récepteur augmente, la dose délivrée au foyer et donc la dose reçue par le patient augmente. Cette manœuvre permet également de capturer le maximum de rayonnement diffusé sortant du patient.
- Positionner le détecteur à 100 cm du tube pour optimiser l'efficacité de la grille anti-diffusante et optimiser l'image. Une augmentation de 10 % de la distance de focalisation de la grille résulte en une augmentation de 20 % de la dose au patient.
- Utiliser les filtres de contour pour l'homogénéisation du faisceau permet de minorer l'irradiation des zones filtrées, de limiter le diffusé et d'augmenter la qualité d'image.

- Varier les incidences de travail au cours d'une angioplastie et éviter l'accumulation des doses sur la même zone cutanée.
- Varier les incidences pour éviter l'accumulation sur la même zone cutanée.
- Éviter les travellings de la table, réservés à l'étude des pontages ou des lits d'aval des occlusions.
- Limiter les incidences de travail avec des angulations crânio-caudales et les angulations en oblique gauche qui majorent l'atténuation par interposition de structures musculo-squelettiques. [20,21]
- Exclure les bras du patient du champ d'étude, diminuant l'épaisseur traversée.
- Si nécessité de recourir à une incidence de profil, privilégier une OAD 90° à une OAG 90° afin d'éloigner le tube de l'opérateur.
- Privilégier les grands champs d'exploration et utiliser les zooms numériques pour les éventuels agrandissements. Avec un capteur plan, la résolution spatiale affichée est indépendante du champ d'agrandissement.

Sauf bénéfice médical évident, l'opérateur doit se fixer un seuil limite d'exposition à ne pas dépasser (en rapport avec l'apparition des effets déterministes). L'affichage en temps réel des indicateurs dosimétriques sur le moniteur, l'intervention de signaux sonores pour des niveaux d'alerte prédéfinis constituent des aides précieuses au cours des procédures complexes. Il est indispensable d'identifier les procédures pour lesquels ces limites sont dépassées (de manière justifiée ou accidentelle) pour envisager un suivi personnalisé de ces patients susceptibles de développer une radiodermite. Dans cette optique le recours à des reconstructions dosimétriques à posteriori peuvent trouver son utilité

Les complications cutanées surviennent rarement pour des doses inférieures à 3 à 5 Gy mais peuvent apparaître lorsque les irradiations, même à dose modérée, sont répétées. Les irradiations précédentes doivent être considérées dans l'évaluation des risques liés à un nouvel examen irradiant, en particulier lorsque l'on planifie d'irradier la même zone cutanée. [22] L'accumulation de plusieurs doses, équivalentes en terme d'énergie, ne le sont pas en termes de conséquences biologiques si elles sont reçues sur des durées différentes. Il est nécessaire d'espacer au maximum les procédures si elles doivent être répétées.

Par extension du principe de limitation, le code du travail fixe des limites réglementaires de dose sur 12 mois consécutifs par catégorie de travailleurs exposés aux rayonnements. Les opérateurs sont classés en catégorie A car plus proches des sources et les infirmiers et manipulateurs en radiologie sont classés en catégorie B. Pour le personnel de catégorie A, la limite de dose efficace corps entier est fixé à 20mSv, la dose équivalente pour la peau à 500mSv, pour les extrémités à 500mSv et pour le cristallin à 50mSv et sera abaissée à 20mSv à partir de 2023.

6.3. Radioprotection de l'opérateur

La radioprotection du patient et du professionnel sont interdépendantes. La dose de l'opérateur est proportionnelle à la dose administrée au patient. Mais, en complément de l'optimisation de la dose émise, l'opérateur et le personnel soignant disposent de moyens méthodologiques et matériels (individuels et collectifs) au service de leur protection.

En dehors des situations d'urgence, l'opérateur doit éviter l'exposition (notamment de ses mains) dans le faisceau primaire qui constitue la source principale en terme d'énergie. L'éloignement du patient et du tube reste la mesure plus efficace puisque la dose diminue selon l'inverse du carré de la distance. L'utilisation de prolongateurs branchés au cathéter et d'un injecteur automatique permettent à

l'opérateur de travailler à distance respectable du point de ponction une fois la sonde positionnée.

Par ailleurs l'interposition d'écrans plombés entre le cardiologue et la source de rayonnement diffusé permettent de limiter significativement la dose reçue. On distingue les équipements de protection collectifs et individuels. Parmi les équipements collectifs, on peut citer le bas volet plombé fixé à la table, qui protège efficacement les extrémités inférieures, et l'écran acrylique plombé accroché à une suspension, voire un paravent plombé mobile, qui permet de diminuer la dose reçue à la tête et aux extrémités supérieures.

Les équipements personnels efficaces comptent le tablier plombé (idéalement d'une épaisseur de 0,5 mm), le cache-thyroïde, les lunettes plombées avec protections latérales. Dans l'étude O'CLOC, la fréquence des opacités du cristallin étaient plus de deux fois moindre chez les porteurs réguliers de lunettes plombées. Les calots plombés quant à eux semblent n'offrir qu'une réduction très minime de la dose reçue à la tête. [23] Si l'utilisation de gants plombés a prouvé son efficacité pour la protection des mains dans certains domaines de la radiologie interventionnelle, elle reste très onéreuse et semble peu adaptée à la cardiologie, où elle risque d'altérer le toucher et la précision des gestes de l'opérateur.

Ces équipements ne vont pas sans certaines limites et inconvénients. Ils n'offrent qu'une protection incomplète du corps de l'opérateur, laissant exposés ses extrémités et sa tête. Vécus comme contraignants car responsables d'inconfort, de fatigue, ils génèrent également des contraintes mécaniques sur le système musculo-squelettique, responsables de complications orthopédiques notamment rachidiennes. [24,25] En réponse à ces problématiques, des cabines de radioprotection mobiles permettant une couverture complète du corps de l'opérateur pourraient permettre d'alléger les dispositifs de protection individuels. [26] Par ailleurs, l'essor de la robotique en salle de cathétérisme pourrait dans le futur révolutionner le poste de travail du cardiologue interventionnel, le plaçant à l'abri des rayons en salle de contrôle. [27]

7. Conclusion

Le risque lié à l'irradiation en salle de cathétérisme cardiaque est probablement sous-estimé et trop peu pris en compte dans la pratique quotidienne. Les mesures de radioprotection doivent être connues de tous les opérateurs et appliquées pour chaque intervention. L'amélioration des technologies, la connaissance et l'application des principes de radioprotection par les opérateurs pourrait contrebalancer la tendance à l'allongement moyen des temps de procédure inhérent à leur complexification. La radioprotection doit devenir une préoccupation majeure du cardiologue interventionnel au prix parfois de compromis en terme de qualité d'image et de contraintes en terme de confort de travail.

Cette démarche d'amélioration des pratiques nécessite la collaboration de nombreux acteurs (cardiologues, infirmières, manipulateurs en radiologie, médecins du travail, constructeurs, industrie, instances de surveillance nationales et européennes, médecins du travail) et les registres recueillant les données dosimétriques des examens pourraient jouer un rôle central dans l'évaluation des risques liés aux rayons et dans le suivi de l'évolution des pratiques.

Remerciements à tous les cardiologues participants au registre France PCI, à tous les ARC et TEC assurant la saisie des données et leur monitoring et à toute l'équipe opérationnelle de France PCI et tout particulièrement à Isabelle Goussard notre data manageuse pour son travail et sa patience.

Références

- [1] Balter S, Miller DL. Patient Skin Reactions From Interventional Fluoroscopy Procedures. *American Journal of Roentgenology* 1 avr 2014;202(4):W335-42.
- [2] Jaco JW, Miller DL. Measuring and monitoring radiation dose during fluoroscopically guided procedures. *Tech Vasc Interv Radiol.* sept 2010;13(3):188-93.

- [3] Kim KP, Miller DL, Balter S, Kleinerman RA, Linet MS, Kwon D, et al. Occupational radiation doses to operators performing cardiac catheterization procedures. *Health Phys.* mars 2008;94(3):211-27.
- [4] Lange HW, von Boetticher H. Randomized comparison of operator radiation exposure during coronary angiography and intervention by radial or femoral approach. *Catheter Cardiovasc Interv.* janv 2006;67(1):12-6.
- [5] Lo TS, Ratib K, Chong A-Y, Bhatia G, Gunning M, Nolan J. Impact of access site selection and operator expertise on radiation exposure; a controlled prospective study. *Am Heart J* oct 2012;164(4):455-61.
- [6] Ostrom QT, Gittleman H, Stetson L, Virk SM, Barnholtz-Sloan JS. Epidemiology of gliomas. *Cancer Treat Res.* 2015;163:1-14.
- [7] Roguin A, Goldstein J, Bar O, Goldstein JA. Brain and neck tumors among physicians performing interventional procedures. *Am J Cardiol.* 1 mai 2013;111(9):1368-72.
- [8] Reeves RR, Ang L, Bahadorani J, Naghi J, Dominguez A, Palakodeti V, et al. Invasive Cardiologists Are Exposed to Greater Left Sided Cranial Radiation: The BRAIN Study (Brain Radiation Exposure and Attenuation During Invasive Cardiology Procedures). *JACC Cardiovasc Interv.* 17 août 2015;8(9):1197-206.
- [9] Marazziti D, Tomaiuolo F, Dell'Osso L, Demi V, Campana S, Piccaluga E, et al. Neuropsychological Testing in Interventional Cardiology Staff after Long-Term Exposure to Ionizing Radiation. *J Int Neuropsychol Soc* oct 2015;21(9):670-6.
- [10] Andreassi MG, Cioppa A, Botto N, Joksic G, Manfredi S, Federici C, et al. Somatic DNA damage in interventional cardiologists: a case-control study. *FASEB J.* juin 2005;19(8):998-9.
- [11] McGeoghegan D, Binks K, Gillies M, Jones S, Whaley S. The non-cancer mortality experience of male workers at British Nuclear Fuels plc, 1946-2005. *Int J Epidemiol.* juin 2008;37(3):506-18.
- [12] Andreassi MG, Piccaluga E, Gargani L, Sabatino L, Borghini A, Faita F, et al. Subclinical carotid atherosclerosis and early vascular aging from long-term low-dose ionizing radiation exposure: a genetic, telomere, and vascular ultrasound study in cardiac catheterization laboratory staff. *JACC Cardiovasc Interv* 20 avr 2015;8(4):616-27.
- [13] Jacob S, Boveda S, Bar O, Brézin A, Maccia C, Laurier D, et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int J Cardiol.* 1 sept 2013;167(5):1843-7.
- [14] Stewart FA, Akleyev AV, Hauer-Jensen M, Hendry JH, Kleiman NJ, MacVittie TJ, 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* 1 févr 2012;41(1-2):1-322.
- [15] Balter S, Hopewell JW, Miller DL, Wagner LK, Zelefsky MJ. Fluoroscopically guided interventional procedures: a review of radiation effects on patients' skin and hair. *Radiology.* févr 2010;254(2):326-41.
- [16] Guesnier-Dopagne M, Boyer L, Pereira B, Guersen J, Motreff P, D'Incan M. Incidence of Chronic Radiodermatitis after Fluoroscopically Guided Interventions: A Retrospective Study. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* 1 mai 2019;30(5):692–698.e13.
- [17] Brenner DJ, Doll R, Goodhead DT, Hall EJ, Land CE, Little JB, et al. Cancer risks attributable to low doses of ionizing radiation: assessing what we really know. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 25 nov 2003;100(24):13761-6.
- [18] Scott BR. Low-dose radiation risk extrapolation fallacy associated with the linear-no-threshold model. *Hum Exp Toxicol.* févr 2008;27(2):163-8.
- [19] GUIDE DES BONNES PRATIQUES DE RADIOPROTECTION DU PATIENT EN CARDIOLOGIE INTERVENTIONNELLE - PDF Téléchargement Gratuit [Internet]. [cité 15 sept 2021]. Disponible sur: <https://docplayer.fr/26223879-Guide-des-bonnes-pratiques-de-radioprotection-du-patient-en-cardiologie-interventionnelle.html>
- [20] Kuon E, Dahm JB, Empen K, Robinson DM, Reuter G, Wucherer M. Identification of less-irradiating tube angulations in invasive cardiology. *J Am Coll Cardiol* 6 oct 2004;44(7):1420-8.
- [21] Farajollahi A, Rahimi A, Khayati Shal E, Ghaffari S, Ghojzadeh M, Tajlil A, et al. Patient's Radiation Exposure in Coronary Angiography and Angioplasty: The Impact of Different Projections. *J Cardiovasc Thorac Res* 2014;6(4):247-52.
- [22] Balter S, Miller DL. Patient skin reactions from interventional fluoroscopy procedures. *AJR Am J Roentgenol.* avr 2014;202(4):W335–42.
- [23] Fetterly K, Schueler B, Grams M, Sturchio G, Bell M, Gulati R. Head and Neck Radiation Dose and Radiation Safety for Interventional Physicians. *JACC Cardiovasc Interv* 13 mars 2017;10(5):520-8.
- [24] Ross AM, Segal J, Borenstein D, Jenkins E, Cho S. Prevalence of spinal disc disease among interventional cardiologists. *Am J Cardiol.* 1 janv 1997;79(1):68-70.
- [25] Goldstein JA, Balter S, Cowley M, Hodgson J, Klein LW. Interventional Committee of the Society of Cardiovascular Interventions. Occupational hazards of interventional cardiologists: prevalence of orthopedic health problems in contemporary practice. *Catheter Cardiovasc Interv.* déc 2004;63(4):407-11.
- [26] Gutierrez-Barrios A, Angulo-Pain E, Noval-Morillas I, Cañadas-Pruaño D, de la Lastra IA, Gheorghe L, et al. The radioprotective effect of the Cathpax® AIR cabin during interventional cardiology procedures. *Catheter Cardiovasc Interv* 12 mai 2021.
- [27] Wegermann ZK, Swaminathan RV, Rao SV. Cath Lab Robotics: Paradigm Change in Interventional Cardiology? *Curr Cardiol Rep.* 31 août 2019;21(10):119.