

UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2021

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

**Établissement de NRD locaux pour les procédures de radiologie
interventionnelle d'hémostase d'urgence : analyse des pratiques de
2015 à 2020**

Présentée et soutenue publiquement le 29 octobre à 16h
Au Pôle Recherche
Par Mehdi HAIDAR

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Jean-Pierre PRUVO

Assesseurs :

Monsieur le Professeur Jonathan SOBOCINSKI

Monsieur le Professeur François PONTANA

Madame le Docteur Delphine GARRIGUE-HUET

Directeur de thèse :

Monsieur le Docteur Benjamin LONGERE

AVERTISSEMENT

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

ABREVIATIONS

AAST	American Association for Surgery of Trauma
ADN	Acide DésoxyriboNucléique
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AHA	American Heart Association
ALNA	Agents Liquides Non Adhésifs
ASN	Autorité de Sûreté Nucléaire
CBCT	Cone Beam Computed Tomography
CERIM	Comité d'Éthique pour la Recherche en Imagerie Médicale
CHU	Centre Hospitalier Universitaire
CIPR	Commission Internationale de Protection Radiologique
DACS	Dose Archiving and Communication System
DMI	Dispositif Médical Implantable
DMSO	Diméthylsulfoxyde
EPI	Équipement de Protection Individuelle
EVOH	Éthylène alcool vinylique
FAST	Focused Assessment with Sonography for Trauma
Gy	Gray
IMC / BMI	Indice de Masse Corporelle / Body Mass Index
IQR	Inter Quartile Range
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
Kair	Kerma dans l'air
KeV	Kilo-électron-volt

LEC	Lithotripsie Extra Corporelle
mA	milliAmpère
NRD	Niveau de Référence Diagnostique
NRL	Niveau de Référence Local
PACS	Picture Archiving and Communication System
PDS	Produit Dose Surface (Dose Area Product, DAP)
pHEMA	polyHydroxyethyl-methacrylate
PICC	Peripherally Inserted Central Catheter
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
RI	Radiologie Interventionnelle
SAMU	Service d'Aide Médicale Urgente
SIR	Société de Radiologie Interventionnelle
Sv	Sievert
TDM	Tomodensitométrie
TIPS	Transjugular Intrahepatic Portosystemic Shunt
THT	Très Haute Tension
UGD	Ulcère Gastro-Duodéal
VGD	Valeur Guide Diagnostique

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	9
I. Présentation de la radiologie interventionnelle (RI).....	9
A. <i>Définition.....</i>	9
B. <i>Historique de la radiologie interventionnelle endovasculaire.....</i>	9
II. La radiologie interventionnelle d'urgence	11
A. <i>Place de la RI dans l'algorithme décisionnel.....</i>	11
B. <i>Matériel utilisé en radiologie interventionnelle endovasculaire d'hémostase</i>	13
C. <i>Description des indications et des procédures endovasculaires réalisées par l'astreinte de radiologie interventionnelle</i>	16
D. <i>Concept de salle hybride</i>	27
III. Rayonnements ionisants	28
A. <i>Différents types de rayonnements</i>	28
B. <i>Production des rayons X en angiographie.....</i>	29
C. <i>Interaction des rayons X avec la matière :.....</i>	30
D. <i>Effets radiobiologiques.....</i>	33
E. <i>En angiographie.....</i>	40
IV. Cadre législatif et optimisation en radioprotection	40
A. <i>Principes ALARA.....</i>	40
B. <i>Radioprotection des travailleurs en RI.....</i>	44
C. <i>Dose Archiving and Communication System (DACS)</i>	45
V. Objectif de l'étude	46
MATERIEL ET METHODES.....	46
I. Caractéristiques de l'étude	46
A. <i>Population.....</i>	47
B. <i>Équipement angiographique.....</i>	47
II. Recueil des données	48
III. Analyse statistique	49
RESULTATS ET DISCUSSION	50
I. Description de la population de l'étude	50
II. Sous-groupe « hémoptysie »	52
A. <i>Résultats.....</i>	52
B. <i>Discussion</i>	56
III. Saignement d'origine hépato-biliaire	58
A. <i>Résultats.....</i>	58
B. <i>Discussion</i>	59
IV. Hémorragie digestive haute	61
A. <i>Résultats.....</i>	61
B. <i>Discussion</i>	62
V. Hémorragie digestive basse.....	62

A.	<i>Résultats</i>	63
B.	<i>Discussion</i>	63
VI.	Saignement d'origine rénale	64
A.	<i>Résultats</i>	64
B.	<i>Discussion</i>	65
VII.	Saignement d'origine rétropéritonéale	66
A.	<i>Résultats</i>	66
B.	<i>Discussion</i>	67
VIII.	Saignement d'origine splénique	67
A.	<i>Résultats</i>	68
B.	<i>Discussion</i>	69
IX.	Traumatisme du bassin	69
A.	<i>Résultats</i>	69
B.	<i>Discussion</i>	70
X.	Saignement d'origine génitale	71
A.	<i>Résultats</i>	71
B.	<i>Discussion</i>	72
XI.	Saignement en provenance de la paroi abdominale antérieure	73
A.	<i>Résultats</i>	73
B.	<i>Discussion</i>	74
XII.	Pose de filtre cave	74
A.	<i>Résultats</i>	75
B.	<i>Discussion</i>	76
XIII.	Analyse sur toute la population	76
A.	<i>Analyse bi-variée</i>	76
B.	<i>Analyse multivariée (régression logistique)</i>	78
C.	<i>Discussion</i>	79
XIV.	Discussion générale	80
A.	<i>Résultats de l'étude en comparaison avec la littérature</i>	80
B.	<i>Limites de l'étude</i>	82
C.	<i>Importance des connaissances de l'opérateur en radioprotection</i>	84
	CONCLUSION	85
	BIBLIOGRAPHIE	86

RESUME

Objectifs de l'étude :

Établir les niveaux de référence diagnostique (NRD) locaux des gestes de radiologie interventionnelle d'hémostase aux urgences du CHU de Lille pour répondre aux recommandations européennes en vigueur.

Dresser un bilan des gestes réalisés par l'astreinte de radiologie interventionnelle.

Matériel et méthodes :

Recueil rétrospectif manuel des procédures endovasculaires réalisées par l'astreinte de radiologie interventionnelle du 7 avril 2015 au 1^{er} octobre 2020 dans la salle hybride des urgences du CHU de Lille. Étude de la distribution du produit dose surface (PDS) et du kerma dans l'air (Kair) (n = 1489 procédures). Analyses en sous-groupes selon les effectifs pour chaque indication.

Résultats :

Les analyses multivariées retrouvaient comme facteur de risque de dépassement du 75^{ème} percentile (NRD) du PDS le sexe masculin, l'âge, l'IMC, le temps de scopie, l'utilisation d'incidence oblique et d'acquisition volumique, et un nombre élevé d'images de graphies ($p < 0,05$). L'utilisation de la collimation était un facteur protecteur ($p < 0,05$).

Les NRD locaux se situaient en-dessous ou étaient du même ordre que les NRD publiés dans la littérature. Le déploiement d'un système d'archivage de la dose (DACS) apparaît comme un outil prometteur en permettant un recueil automatisé et rapide tout en limitant le risque de données manquantes.

Conclusion :

La prise en charge des patients par embolisation d'hémostase aux urgences du CHU de Lille se fait dans le respect des principes de radioprotection, malgré le contexte aigu. Un logiciel d'archivage des doses facilite le suivi et l'évaluation des mesures de radioprotection.

INTRODUCTION

I. Présentation de la radiologie interventionnelle (RI)

A. Définition

La radiologie interventionnelle est définie par une approche mini-invasive guidée par l'image à but diagnostique mais aussi à but thérapeutique (1). Le guidage peut se faire par radiologie conventionnelle, tomodensitométrie (TDM), échographie, voire par imagerie par résonance magnétique (IRM).

La radiologie interventionnelle par voie endovasculaire utilise des amplificateurs de brillance ou des capteurs plans, donc la radiologie de projection.

Elle intéresse aussi bien les réseaux artériels systémique et pulmonaire que veineux.

B. Historique de la radiologie interventionnelle endovasculaire

La première embolisation connue a été réalisée par Robert Dawbain dès 1904 (2). Elle a consisté à emboliser avec de la paraffine des branches de l'artère carotide externe dans un contexte de néoplasie, dans le but de ralentir le flux sanguin et limiter le risque hémorragique per-opératoire.

La méthode de ponction des vaisseaux a été mise au point dans les années 1950 par un radiologue suédois (Figure 1), Sven-Ivar Seldinger, d'abord à but diagnostique puis très vite à finalité thérapeutique (3).

Figure 1

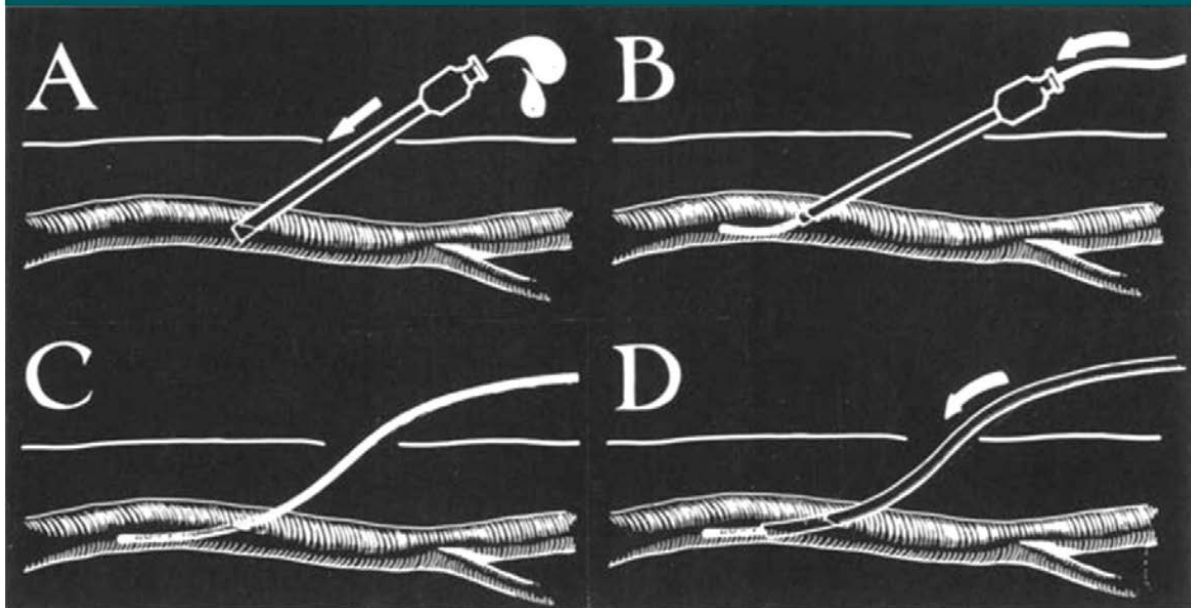


Figure 1: Introduction of guided interarterial catheter. *A*, Insertion of the needle into the artery. *B*, Passage of the spring guide through the needle into the arterial lumen. *C*, Withdrawal of the needle, with the guide in the arterial lumen. *D*, Threading of the tubing over the guide into the arterial lumen (fig 1 from reference 2).

Figure 1 : Cathétérisme vasculaire selon la méthode Seldinger d'après (3)

Par la suite, de multiples procédés et matériaux se sont développés en vue d'optimiser la voie endovasculaire : mise au point de l'introducteur ou désilet, du matériel de navigation, du cathétérisme, des dispositifs médicaux implantables (DMI) (4).

On peut citer quelques étapes :

- La première angioplastie artérielle par Dotter et al en 1964 (5,6).
- L'embolisation artérielle pour ulcère gastrique hémorragique dans les années 1970 (7).
- L'embolisation des artères bronchiques en 1973 par Rémy et al (8).
- Le Transjugular Intra Hepatic Portosystemic Shunt (TIPS) à la fin des années 1960 par Rosch et al (3,9).

II. La radiologie interventionnelle d'urgence

Le bénéfice de la radiologie interventionnelle d'hémostase est certain, notamment dans la pathologie traumatique où de multiples études ont démontrées un bénéfice en termes de morbi-mortalité et constitue à ce titre une option thérapeutique de premier plan (10).

A. Place de la RI dans l'algorithme décisionnel

Le circuit intra et péri-hospitalier du patient est essentiel à optimiser afin d'éviter au maximum une perte de chance, surtout dans le contexte aigu. Selon la gravité de l'état clinique, le patient est amené par le Service d'Aide Médicale Urgente (SAMU) au déchoquage chirurgical du Centre Hospitalier Universitaire (CHU) de Lille. En situation intra hospitalière, l'acheminement du patient se fait via le SAMU ou par les services de réanimation. En effet, la prise en charge incluant la RI nécessite un plateau technique réanimatoire et médico-radio-chirurgical adapté, équipé d'un service de réanimation optimisé, d'un scanner et d'une salle d'angiographie. En cas de syndrome hémorragique aigu, le patient bénéficie de mesures médicales indispensables afin de stabiliser ou de maintenir les paramètres hémodynamiques : monitoring, remplissage, transfusion, administration d'amines vasopressives. En cas d'hémodynamique stable, un scanner est réalisé permettant la recherche de saignement actif à l'origine du syndrome hémorragique. L'interprétation par le radiologue est alors fondamentale, au carrefour de la prise en charge, car la décision du traitement le plus adapté se fait en concertation pluridisciplinaire et en fonction des résultats de l'imagerie. Ce scanner préopératoire permet au radiologue interventionnel de planifier sa stratégie :

évaluation de la voie d'abord, de la navigation via l'étude de l'anatomie et de la qualité du réseau vasculaire et de prévoir l'embolisation.

En cas de polytraumatisme avec instabilité hémodynamique, sont réalisées au lit du patient des radiographies du thorax et du bassin, ainsi qu'une FAST échographie (Focused Assessment of the Sonographic examination of Trauma), auquel cas le radiologue interventionnel peut être amené à réaliser une angiographie diagnostique puis à visée thérapeutique le cas échéant (11,12).

Une angiographie artérielle (artériographie) consiste à opacifier une artère en injectant in situ du produit de contraste iodé, sous un mode graphie. Il s'agit donc d'une acquisition avec un contraste positif. Elle peut être à visée diagnostique ou thérapeutique. Une artériographie est capable de dépister une fuite active avec un débit $> 0,5$ ml/min (contre 0,3 ml/min pour l'angioscanner) (13).

Plusieurs alternatives de traitements existent en fonction du contexte clinico-hémodynamique, des données de l'imagerie, du plateau technique disponible et des habitudes selon les centres et sont à définir en concertation multidisciplinaire. Le radiologue interventionnel est ainsi sollicité le plus souvent par téléphone. En effet, les traitements d'hémostase par voie endovasculaire occupent aujourd'hui une place essentielle dans les syndromes hémorragiques aigus du fait de leur efficacité et de leur caractère peu invasif (14). Ils sont réalisés après stabilisation du patient, en salle d'angiographie en présence de l'équipe d'anesthésie-réanimation. La procédure se déroule en plusieurs étapes. Après anesthésie locale ou générale, un abord fémoral commun est le plus souvent préféré. Le matériel de navigation et de cathétérisme, guidés par l'image permet une angiographie confirmant les anomalies vues au scanner. Une fois la cible atteinte, toujours après concertation ayant défini la stratégie

opératoire, une embolisation est réalisée. Le matériel est alors retiré puis le point de ponction comprimé jusqu'à hémostase ou occlus avec un système de fermeture dédié. Le matériel peut être laissé en place, permettant un accès rapide en cas de besoin de réitérer la procédure. En cas d'impossibilité de traitement endovasculaire, par exemple en cas d'échec de cathétérisme ou de données angiographiques rendant la balance bénéfice-risque défavorable, les autres alternatives doivent avoir été envisagées : poursuite, optimisation ou changement du traitement médical ou prise en charge chirurgicale. Une surveillance post-opératoire en milieu réanimatoire spécialisé est primordiale afin d'évaluer l'efficacité du traitement à court terme et un contact permanent entre l'équipe de réanimateurs, radiologue interventionnel, chirurgiens et médecins référents doit être maintenu.

B. Matériel utilisé en radiologie interventionnelle endovasculaire d'hémostase

La première embolisation a été réalisée avec des matériaux organiques : dure-mère bovine, caillot sanguin autologue... Puis de nouveaux agents se sont développés conjointement entre les industriels et les praticiens interventionnels.

1) Agents solides

a) Coils

Ce sont des spires souples et fines en forme de ressort faites d'un alliage métallique associées ou non à un revêtement de fibres synthétiques ou à un gel hydrophile permettant d'augmenter le pouvoir occlusif (4,15). Ils existent en différentes longueurs,

diamètres et formes. Ils peuvent être à détachement contrôlé via un système sécurisé, ou non (poussés avec un guide ou avec du sérum physiologique) et sont amenés à destination via la sonde ou un microcatheter. L'occlusion se fait par effet mécanique et par activation de l'hémostase thrombogène.

b) Occluders (ou plugs)

Ils ont utilisés pour occlure des vaisseaux de gros calibre (branches de 1^{er} ou de 2^{ème} ordre le plus souvent) et permettent ainsi la vaso-occlusion par des mécanismes mécanique et thrombogène. Ils sont constitués d'un à trois modules d'occlusion en nitinol solidaires montés en série ce qui permet d'assurer l'accumulation de fibrine et de plaquettes (4).

c) Microparticules

Ces petites billes fabriquées en polymère synthétique sont fournies en seringues ou en flacons pré-remplis et sont calibrées (40 à 1300 µm). Mélangées à du produit de contraste iodé selon les consignes délivrées par le fabricant pour obtenir une suspension homogène, elles sont injectées prudemment sous contrôle scopique dans le vaisseau cible. Elles provoquent un degré d'ischémie variable selon leur diamètre et une réponse inflammatoire du tissu nécrosé, responsable d'un syndrome post-embolisation, bénin (douleurs locales et syndrome inflammatoire). Un des dangers est l'embolisation hors cible par reflux (4,15).

2) Agents liquides

a) Colles biologiques

Elles sont faites à base de dérivés de cyanoacrylate et polymérisent au contact des milieux ioniques, notamment le sang. La colle injectée via le microcathéter est diluée

dans une huile iodée, selon un ratio qui permet de moduler la vitesse de polymérisation de la colle et ainsi une occlusion plus ou moins distale du lit d'aval. Avant l'injection, le volume d'espace mort du matériel de cathétérisme est purgé avec une solution glucosée afin d'empêcher une polymérisation de la colle dans celui-ci (4,15).

L'injection de colle biologique provoque une ischémie, une toxicité cellulaire et une réaction exothermique (45° C) à l'origine d'un syndrome post-embolisation.

b) Agents liquides non adhésifs (ALNA)

L'éthylène vinyl-alcool (EVOH) et le polyhydroxyethyl-methacrylate (pHEMA) sont des copolymères dissouts dans du diméthyl-sulfoxyde (DMSO) qui précipitent et se solidifient au contact du sang. L'EVOH requiert un temps de préparation de vingt minutes pour homogénéiser la solution avec la poudre de tantale permettant sa radio-opacité (inutile avec le pHEMA pour lequel de l'iode est fixé de manière covalente au copolymère). Très utilisés dans les malformations artério-veineuses ou pour l'exclusion des endofuites aortiques, ces produits doivent être injectés lentement pour prévenir une toxicité systémique liée au DMSO (15).

L'utilisation de l'EVOH doit être anticipée dans les prises en charge en urgence en raison de son temps de préparation.

3) Gélatine résorbable

La gélatine de porc purifiée est très utilisée en urgence pour occlure temporairement un vaisseau. Elle se résorbe dans une fenêtre s'étendant entre 5 jours et 6 semaines et permet une conservation des vaisseaux (4). Peu chère, elle est se présente souvent sous forme de plaquettes découpées en fragments de taille voulue avant d'être

mélangé à du produit de contraste iodé. Les fragments en suspension sont injectés via une sonde ou un microcathéter (4,15).

4) Agents couvrants

En cas de brèche vasculaire, une des solutions est de couvrir cette brèche tout en conservant la perméabilité du vaisseau porteur lorsque la perméabilité de ce dernier doit être préservée. Pour cela, il est possible d'utiliser un stent couvert, armature cylindrique métallique rendue imperméable par une membrane de polytétrafluoroéthylène (PTFE) ou de polyester tissé. Les stents peuvent être auto-expansibles ou montés sur ballonnet. Leur déploiement est conditionné par la mise en place d'un guide de support rigide assurant la stabilité lors de la navigation du stent. Différents diamètres et longueurs sont disponibles en fonction de la lésion et du vaisseau à traiter (4,15,16).

C. Description des indications et des procédures endovasculaires réalisées par l'astreinte de radiologie interventionnelle

1) Hémoptysie

L'hémoptysie est une expectoration de sang frais en provenance des voies aériennes sous-glottiques (17). On distingue l'hémoptysie dite « symptôme », nécessitant un bilan sans urgence, de l'hémoptysie « maladie » qui peut engager le pronostic vital du fait du risque d'asphyxie. En effet, le volume anatomique de l'espace mort des voies aériennes est seulement de 150 ml (18).

L'hémoptysie peut avoir des causes diverses : carcinome broncho-pulmonaire ; maladies infectieuses (tuberculose, aspergillose), maladies de système (Behçet, granulomatoses...), maladies chroniques des voies aériennes (mucoviscidose, dilatation des bronches...) (19). L'infarctus pulmonaire lié à une embolie peut être pourvoyeur d'hémoptysie mais ne relève pas d'un traitement par embolisation.

L'embolisation est le traitement de première intention après échec des mesures médicales (administration de drogues vaso-constrictives systémiques telle que la Terlipressine ou locale comme l'acide tranexamique, arrêt des anti-thrombotiques, ventilation...). Les recommandations indiquent l'embolisation pour un seuil de 200ml/24h-48h ou de 100 ml en une fois. Ces seuils sont divisés par deux en cas d'insuffisance respiratoire chronique (17). La tolérance clinique est un facteur essentiel à considérer indépendamment des seuils.

La fibroscopie bronchique n'est pas un pré-requis obligatoire avant une éventuelle embolisation (19).

Dans 90% des cas, l'hypervascularisation pathologique provient des artères systémiques en premier lieu desquelles les artères bronchiques (19). Il faut prêter attention à la présence d'artères bronchiques ectopiques naissant d'autres segments aortiques et à d'éventuelles artères systémiques non bronchiques, en provenance des artères thoraciques internes, diaphragmatiques et intercostales par exemple. Le scanner préopératoire est primordial pour l'étude vasculaire.

Si une embolisation est décidée, des microparticules > 500 µm sont injectées du fait de la présence de shunts broncho-pulmonaires. Le succès technique immédiat varie entre 70 et 90% (19).

Dans les artères pulmonaires, responsables de 5 à 10% des cas d'hémoptysie, l'agent d'hémostase dépend de la nécessité ou non de conserver la perméabilité du vaisseau causal.

2) Saignement d'origine hépato-biliaire

Il existe plusieurs étiologies à un saignement hépatique : traumatique, iatrogène (post-chirurgical, biopsie percutanée, thermo-ablation tumorale...), tumorale (carcinome hépato-cellulaire, adénome hépatique). Les différentes possibilités de traitement médical, radiologique ou chirurgical, doivent être discutées en concertation multidisciplinaire selon le patient et le type de pathologie. Seules les artères peuvent être la cible d'une embolisation, en particulier dans les traumatismes et dans un contexte d'hépatopathie chronique où le foie est plus fragile et à l'origine de troubles de la coagulation (20).

La vascularisation artérielle hépatique n'est modale que dans 55% des cas environ et les variantes sont nombreuses (21).

En fonction de l'anomalie vasculaire, du contexte clinique et du foie sous-jacent, l'embolisation peut être temporaire ou définitive avec notamment des coils et de la gélatine résorbable. Il importe d'analyser le retour porte, responsable de 70% de la vascularisation du foie contre 30% par l'artère hépatique, afin de ne pas créer une ischémie hépatique. Le retour veineux porte doit être analysé par échographie, par scanner ou pendant l'artériographie.

Dans la cohorte de Monnin et al portant sur 14 patients traités par embolisation pour traumatisme hépatique, le succès technique primaire était de 95% (22).

3) Hémorragie digestive haute

Une hémorragie digestive haute trouve son origine en amont de l'angle duodéno-jéjunal.

La majorité des hémorragies digestives hautes est dominée par les ulcères gastroduodénaux (UGD) hémorragiques. D'autres causes existent notamment les gastrites et les œsophagites. Les complications de l'hypertension portale, relevant d'un TIPS, ne seront pas abordées.

Concernant les UGD hémorragiques, une embolisation est indiquée en cas de deux échecs d'hémostase par voie endoscopique, préférentiellement après réalisation d'une TDM à la recherche d'anomalie vasculaire et pour l'analyse de la cartographie artérielle. La mise en place d'un clip radio-opaque par l'endoscopiste au niveau du site de saignement constitue un bon repère lors de l'angiographie.

L'embolisation de l'artère causale en amont et en aval du site hémorragique (technique dite du sandwich) est la procédure classique. Des coils associés ou non à des microparticules calibrées (300-500 μm) sont utilisés, même en l'absence d'anomalie artériographique, de manière probabiliste. Le risque d'échec de procédure ou de récurrence hémorragique précoce est réel du fait d'une richesse anastomotique au sein des arcades duodéno-pancréatiques.

Enfin, les hémorragies survenant dans les suites d'une duodéno-pancréatectomie céphalique sont le plus souvent secondaires à saignement du site opératoire. L'embolisation consiste à occlure le vaisseau causal au sein des arcades duodéno-pancréatiques. Chez ces patients morbides sortant d'une chirurgie lourde aux

complications fréquentes, la concertation entre radiologues, anesthésistes-réanimateurs et chirurgiens est primordiale.

Dans la littérature le succès technique primaire est élevé, de 93 à 100% mais avec un succès clinique variant de 51 à 88%, les récurrences de saignement n'étant pas rares dans ces pathologies (23).

4) Hémorragies digestives basses

Elles proviennent en aval de l'angle de Treitz et les origines les plus fréquentes sont les diverticules hémorragiques, les colites ischémiques, les angiodysplasies et les néoplasies coliques. Trente à 40% des hémorragies digestives sont d'origine basse aux États-Unis (13).

On distingue les rectorragies des mélémas. Si le patient est stable hémodynamiquement, une coloscopie est réalisée dans les 24h après préparation (13,24). La fibroscopie haute est également réalisée en phase aiguë si possible pour ne pas méconnaître un ulcère gastro-duodéal avec hémorragie massive. En cas de syndrome hémorragique aigu chez un patient instable hémodynamiquement, une embolisation sélective est indiquée lorsque l'origine du saignement est identifiée (24). Dans tous les cas, le geste approprié doit être réalisé après concertation pluridisciplinaire et après ou en même temps que les mesures réanimatoires de première intention : surveillance en milieu spécialisé selon l'état clinique, correction des troubles de la coagulation, transfusion, remplissage... La chirurgie est pratiquée le plus souvent en cas d'échec des autres thérapeutiques.

L'embolisation concerne surtout les artères mésentériques supérieure et inférieure, et le réseau hypogastrique (15). Le riche réseau anastomotique entre ces artères expose

à une récurrence du saignement ou à une embolisation hors cible. Il importe donc d'effectuer un cathétérisme le plus sélectif possible de la branche causale. Les coils, les colles biologiques, les microparticules et la gélatine résorbable sont utilisés selon l'expérience de l'opérateur et les habitudes locales. Les coils et les cyano-acrylates démontreraient la meilleure efficacité (13). Dans la littérature, le succès technique primaire est de 63 à 96% mais une récurrence de saignement reste observée dans 11 à 50% des cas selon la cause (13).

5) Saignement d'origine rénale

Il existe des atteintes rénales dans 1 à 5% de l'ensemble des traumatismes et le rein est l'organe le plus fréquemment atteint de l'appareil génito-urinaire (25). La rupture d'angiomyolipome, les faux-anévrismes post-lithotripsie extracorporelle (LEC), post-néphrectomie ou post-biopsie sont également accessibles à l'embolisation.

L'hémorragie est le plus souvent contenue dans l'environnement périrénal du fait de la présence de fascias robustes, permettant ainsi le tamponnement sous traitement médical optimisé.

Un traitement endovasculaire peut être indiqué selon l'étiologie, la gravité et bien sûr la tolérance du patient. La vascularisation du rein est dite terminale, signifiant qu'une exclusion de la branche causale entraînera un infarctus rénal d'aval (15).

Si une anomalie vasculaire tronculaire est constatée, une exclusion par des agents proximaux (coils, plug, stent couvert) est indiquée. Si l'anomalie est distale, un microcathétérisme peut être nécessaire avec une embolisation par micro coils, colle ou particules permettant ainsi un traitement le plus conservateur possible.

Dans la littérature, le succès technique primaire varie de 81% pour les lésions iatrogènes à 100% pour les lésions traumatiques (26).

6) Hématome rétropéritonéal

Les hématomes des muscles ilio-psoas sont de plus en plus fréquents et largement favorisés par les traitements anti-coagulants prescrits chez une population vieillissante (27,28).

Ces lésions relèvent d'un traitement médical en première intention. En cas de dégradation malgré ces mesures, chez des patients le plus souvent porteurs de nombreuses comorbidités, l'embolisation est alors indiquée. Le traitement chirurgical est envisagé en cas d'échec de l'embolisation (15,27,28).

Les artères du rétropéritoine et de la paroi abdominale postérieure le plus souvent incriminées sont les artères lombaires, ilio-lombaires, circonflexe iliaque profonde et parfois les artères sous-costales (15). La gélatine résorbable peut être utilisée dans les artères supposées causales de manière probabiliste si aucune extravasation n'est retrouvée lors des artériographies sélectives. Les coils et la colle biologique permettent d'occlure le vaisseau responsable de la fuite active. Le principal risque est l'embolisation hors cible d'une branche radiculo-médullaire antérieure, pouvant être responsable d'une ischémie médullaire.

7) Saignement d'origine splénique

Les traumatismes sont la première cause de lésions spléniques hémorragiques et la rate est le premier site atteint dans les traumatismes abdominaux fermés. Quarante mille traumatismes spléniques sont observés chaque année aux États-Unis (29). Les lésions spléniques traumatiques sont classées par gravité selon la classification AAST (American Association for the Surgery of Trauma) (30). Les traitements peuvent être d'ordre médical, endovasculaire ou chirurgical. Un grade III de l'AAST ou plus sans lésion vasculaire chez un patient stable relève en général d'un traitement endovasculaire (31). Une embolisation tronculaire proximale de l'artère splénique a pour but de réduire la pression intra splénique due à l'œdème et à l'hématome et d'éviter la rupture capsulaire secondaire. Des coils ou des plugs sont mis classiquement entre l'artère pancréatique dorsale et l'artère grande pancréatique.

Si une anomalie vasculaire intra-splénique est mise en évidence à l'artériographie, une embolisation sélective en plus de l'embolisation tronculaire est nécessaire (30).

Le succès technique immédiat était de 98% dans la série Frandon et al (32).

Les autres causes d'hémorragie splénique sont plus rares : iatrogènes (post-opératoire, post-biopsie...), rupture spontanée de la rate (syndromes myéloprolifératifs, mononucléose infectieuse...).

8) Traumatisme du bassin

Les traumatismes du bassin sont fréquents. L'étude de Demetriades et al retrouvait une prévalence de 4 à 9 % dans les polytraumatismes (33). La mortalité en cas de choc hémorragique varie de 36 à 54 %, conditionnée également par l'atteinte des

organes abdomino-pelviens, constatée dans 11 à 20 % des cas (36). Le saignement peut être d'origine artérielle, veineuse ou osseuse. L'embolisation est indiquée en cas de fracture instable et en cas de choc hémorragique contrôlé et se fait idéalement après réduction du foyer fracturaire du fait d'un risque élevé de récurrence hémorragique (34).

Un abord uni ou bilatéral fémoral commun est réalisé pour cathétérisme des artères iliaques internes puis de leur tronc antérieur (15). En l'absence de fuite active, une embolisation à la gélatine résorbable est réalisée, toujours bilatéralement en raison d'un riche réseau anastomotique et du mécanisme des fractures de la ceinture pelvienne. En cas d'extravasation, une embolisation sélective définitive est réalisée.

L'étude rétrospective de Wong et al en 2000 portant sur 507 patients rapportait un succès technique de 100% avec cependant une mortalité de 3 à 30% du fait d'un contexte grave (choc hémorragique, lésions associées...) (35).

9) Hémorragie de la délivrance

Les hémorragies de la délivrance se définissent comme l'extériorisation de plus de 500 ml en 24h pour un accouchement par voie basse et 1000 ml/24h en cas de césarienne (15,36). Dans les pays développés, la mortalité maternelle dans les suites d'une hémorragie grave de la délivrance est de 1/100 000, et jusqu'à 28% dans les pays en voie de développement (37). Le ballon de Bakri a considérablement changé l'algorithme de prise en charge de ces patientes et amélioré le pronostic mais l'embolisation garde sa place en cas d'échec avant l'hystérectomie d'hémostase.

Dans près de 70% des cas, la cause de l'hémorragie est l'atonie utérine résistante aux ocytociques (36). Le traitement d'hémostase par voie endovasculaire consiste à

cathétériser les artères utérines, à défaut les troncs antérieurs des artères iliaques internes, et emboliser avec de la gélatine résorbable. Le geste doit être le plus efficace et le plus rapide chez ces femmes jeunes avec pronostic vital engagé. La série de Chabrot et al portant sur 116 patientes embolisées pour une hémorragie de la délivrance rapportait un succès technique immédiat de 90% (38). Les données des revues systématiques de Soro et de Labarta, toutes deux publiées en 2016, montraient l'efficacité de l'embolisation avec préservation de la fertilité (1,39,40).

Il existe d'autres causes d'hémorragie du post-partum parmi lesquelles les pathologies placentaires, les lésions d'autres artères du pelvis (artères cervico-vaginales par exemple), ou les coagulopathies. La stratégie se définit en concertation pluridisciplinaire entre obstétriciens, anesthésistes-réanimateurs et radiologues.

10) Saignement des membres

Les lésions vasculaires surviennent le plus souvent en cas de traumatisme pénétrant ou à haute vitesse. Elles peuvent être des faux anévrismes, des dissections, des lacérations, des hématomes muraux voire des fistules artério-veineuses (15).

Les lésions artérielles surviennent dans 5% des cas de traumatismes des membres supérieurs. L'artère brachiale est le site le plus fréquemment atteint, dans environ 31 à 54% des cas. Cinquante pour cent des amputations de membres supérieurs ont lieu après 6h (41).

En plus de l'examen clinique, l'échographie-doppler a une place importante car praticable au lit du patient et elle permet un bilan vasculaire rapide (41,42).

Une artériographie permet l'hémostase avec ou sans préservation du vaisseau lésé après discussion collégiale avec les chirurgiens orthopédiques et vasculaires, les anesthésistes-réanimateurs et les radiologues en fonction des lésions associées et du pronostic.

11) Saignement en provenance de la paroi abdominale antérieure

Les hématomes de la paroi abdominale sont fréquents et sont largement favorisés par les anticoagulants ou les causes iatrogènes comme les ponctions d'ascite, chez des patients souvent âgés avec des comorbidités favorisant les saignements (cirrhose par exemple). En cas d'échec du traitement médical ou de mauvaise tolérance, l'embolisation est réalisée (43). L'artère épigastrique inférieure est le vaisseau le plus souvent incriminé surtout lorsque l'hématome siège dans la partie inférieure des muscles grands droits de l'abdomen (15,43).

L'artère circonflexe iliaque profonde et l'artère épigastrique supérieure sont plus rarement atteintes. Un riche réseau anastomotique fait privilégier des agents d'embolisation distale comme la colle biologique (43).

L'étude rétrospective d'Albuquerque et al portant sur 11 patients ayant présenté un hématome pariétal antérieur embolisé avec de la colle biologique, 100% de succès technique immédiat a été observé sans complication per-procédure (43).

12) Pose de filtre cave

Bien que concernant la pathologie thrombotique et non hémorragique, la filtration cave est fréquemment réalisée dans le cadre de l'urgence.

Les recommandations de l'American Heart Association (AHA) de 2016 et celles de la Société de Radiologie Interventionnelle (SIR) indiquent la pose d'un filtre cave en cas de contre-indication à la mise en place d'une anticoagulation efficace dans un contexte de thrombose veineuse proximale ou d'embolie pulmonaire aiguë (1,44).

Environ 13% des patients avec une maladie thromboembolique veineuse aiguë bénéficient de la pose d'un filtre cave (45).

La voie d'abord est classiquement une veine fémorale commune ou jugulaire interne. Le filtre cave est généralement déployé en position sous-rénale.

D. Concept de salle hybride

Les salles hybrides permettent d'utiliser les technologies d'imagerie médicale au sein d'un bloc de chirurgie conventionnelle (46). Équipées d'un arceau mobile contenant un tube et un détecteur, les imageries en coupes (TDM, IRM) peuvent être fusionnées avec les images de scopie, ce qui facilite le repérage et le cathétérisme.

Cet environnement permet de convertir un geste de radiologie interventionnelle en chirurgie ouverte ou de pratiquer des prises en charge hybrides en équipe pluridisciplinaire radio-chirurgicale (46).

Ces équipements autorisent désormais la réalisation d'une imagerie tomographique à faisceau conique (Cone Beam Computed Tomography, CBCT) qui permet une acquisition volumique à la manière d'un scanner.

L'exposition aux rayonnements ionisants, parfois intense, est l'inconvénient principal de ces gestes faits sous guidage radiologique. Le radiologue interventionnel doit

maitriser les bases physiques des rayons X, les risques liés à leur exposition, et donc les moyens mis à disposition pour réduire au maximum la dose délivrée tant au patient qu'au personnel soignant présent.

III. Rayonnements ionisants

A. Différents types de rayonnements

1) Rayonnement alpha

Il s'agit d'un atome d'hélium (${}^4_2\text{He}$). C'est une particule lourde peu pénétrante avec la matière du fait des interactions précoces faisant céder beaucoup d'énergie à la matière par phénomène d'ionisation. Ils relèvent de la radiothérapie interne.

2) Rayonnement bêta

Une particule de type électron ou positon entre en contact avec la matière. Également peu pénétrante, elle modifie le niveau énergétique ou le nombre des électrons du cortège électronique des atomes.

3) Rayonnement gamma

Les photons gamma émanent d'un noyau atomique instable qui émet un rayonnement hautement énergétique afin de dissiper de l'énergie et devenir stable.

4) Rayons X

Découverts par Roentgen en 1897 et appelés X car leur nature était alors inconnue, ce type d'onde électromagnétique (photons) est à l'origine de la radiologie.

B. Production des rayons X en angiographie

Dans une enceinte sous vide (tube radiogène), des électrons sont soumis à un champ électrique très élevé afin de les accélérer avant de les faire percuter sur une anode, généralement en tungstène. Les particules bêta incidentes vont être déviées par le cortège électronique des atomes composant l'anode, conduisant à leur ralentissement et donc à une perte d'énergie cinétique qui est dissipée sous la forme de photons X (dit rayonnement de freinage ou *bremsstrahlung*). Ce tube est placé en angiographie en dessous du patient tandis qu'un détecteur, diamétralement opposé permet de recevoir les rayons.

Un filtre est placé à la sortie du tube, le plus souvent composé d'aluminium et de cuivre, afin d'arrêter les rayons de plus basse énergie ne contribuant pas à la formation de l'image. En effet, ces rayons sont trop peu énergétiques pour pouvoir ressortir du patient et participer à la création de l'image, mais contribueraient en l'absence de filtration à une augmentation de la dose délivrée au patient.

La grille anti-diffusante apposée à l'entrée du détecteur permet d'arrêter le rayonnement diffusé que l'on peut assimiler à une réflexion des rayons X dans des directions aléatoires (effet Compton). La grille, orientée dans l'axe du faisceau primaire, est d'autant plus efficace que le patient est placé au plus près du détecteur.

La puissance du faisceau est modulée par l'intensité du courant permettant de produire les électrons dans le tube (milliampère, mA) et représentant finalement le nombre de photons X produits, ainsi que par son énergie qui dépend de la très haute tension (THT) appliquée pour accélérer les électrons.

C. Interaction des rayons X avec la matière :

Les trois mécanismes d'interaction avec la matière sont l'effet photo-électrique, l'effet Compton et la production de paire (47). Cependant beaucoup de photons n'interagissent pas avec la matière, ne faisant que la « traverser ».

1) Effet photoélectrique

Prédominant à faible énergie, cet effet survient lorsqu'un photon donne toute son énergie à un électron qui est alors éjecté du cortège électronique de l'atome, induisant une ionisation. Le réarrangement du cortège électronique pour pallier la vacance de l'électron émet un nouveau photon X (fluorescence X) (Figure 2).

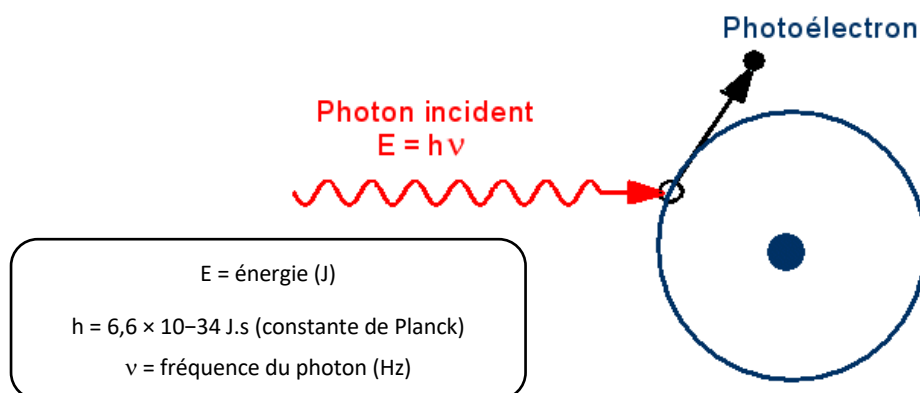


Figure 2 : Effet photoélectrique (d'après (47))

2) Effet Compton

L'interaction d'un photon X avec un électron excite celui-ci et le photon est dévié du fait de l'impact. Une partie de l'énergie du photon incident est absorbée par l'électron (Figure 3). C'est cet effet qui est responsable du rayonnement diffusé, par changement de direction du photon, nécessitant ainsi les mesures de radioprotection pour les personnes présentes en salle d'angiographie.

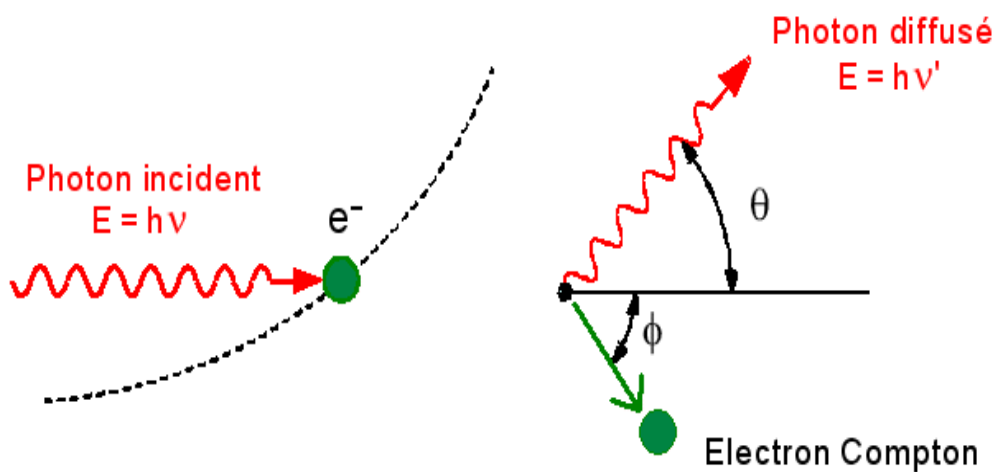


Figure 3 : Effet Compton (d'après (47))

3) Production de paire

Cet effet n'est pas observé en radiologie médicale car il prédomine à haute énergie photonique. Il faut que l'énergie du photon incident soit supérieure à 1022 kilo-électrons-volts (keV). Toute l'énergie est alors absorbée par la matière et une paire électron-positon est créée (Figure 4). Ces deux éléments subissent dans un deuxième temps un processus d'annihilation et génèrent ainsi deux photons de 511 keV émis à 180° l'un de l'autre.

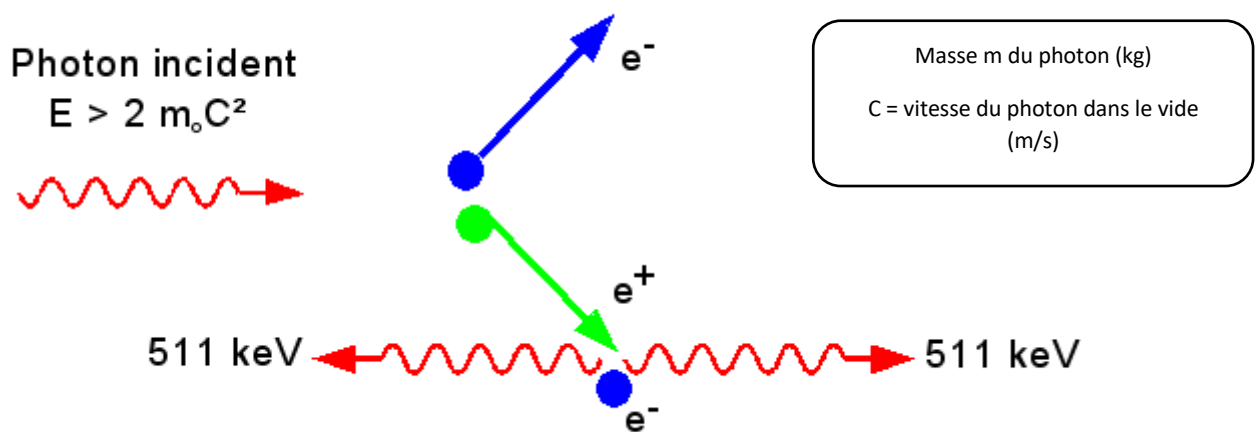


Figure 4 : Effet production de paire (d'après (47))

L'effet Compton est le plus probable car survenant sur une gamme d'énergie étendue (Figure 5).

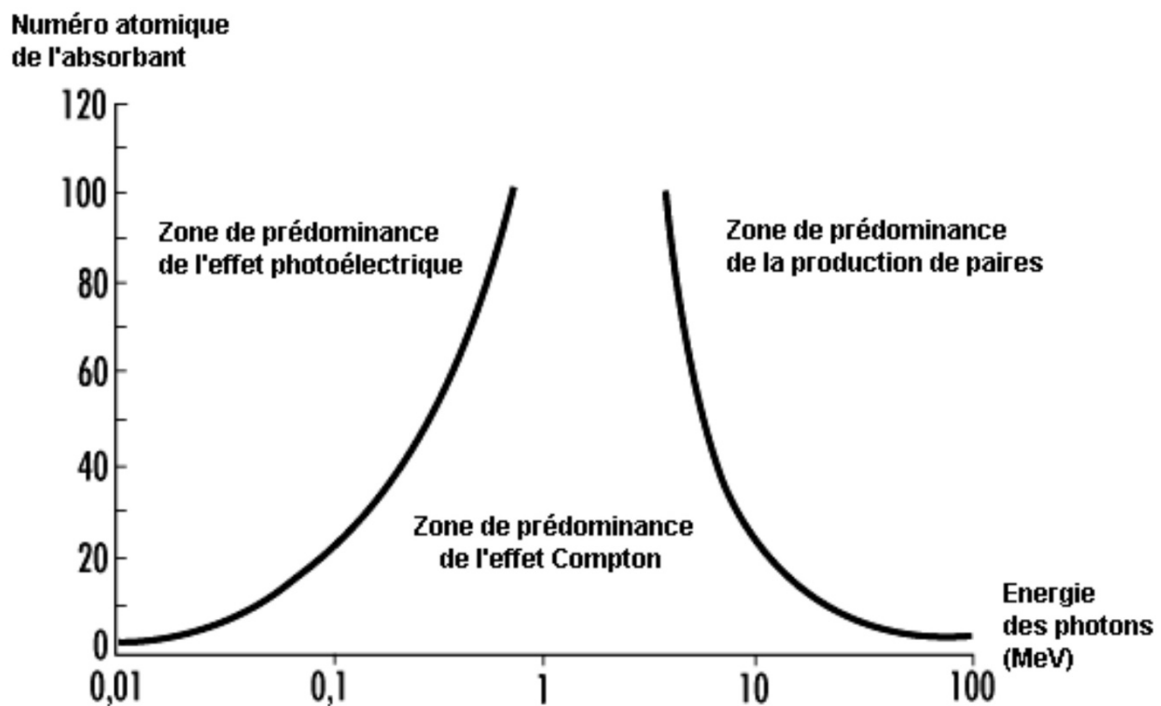


Figure 5 : Interaction du photon avec la matière : probabilité du type d'effet selon la puissance énergétique du photon incident (d'après (48))

D. Effets radiobiologiques

Lorsque les rayons X entrent en contact avec un milieu biologique, les interactions décrites ci-dessus vont aboutir à un dépôt d'énergie (dose) et à une possible modification de ce milieu.

1) Grandeurs physiques en radiobiologie

a) Dose absorbée

La dose absorbée (D_t) est l'énergie déposée dans une masse donnée de tissu et se mesure en J/kg (ou Gray, Gy). Elle est indépendante du type de tissu traversé.

Elle se calcule selon l'équation $D(t) = dE/dm$ où dE représente l'énergie moyenne transmise par le rayonnement (J) et dm la masse de la matière recevant le rayonnement (kg) (49).

Afin d'évaluer l'impact des rayons X sur les tissus biologiques, deux autres grandeurs ont été mises en place, la dose équivalente et la dose efficace (Figure 6).

b) Dose équivalente

La dose équivalente (H_t) prend en compte la nature du rayonnement en introduisant un facteur de pondération du rayonnement (W_r) tel que $H_t = D_t \times W_r$ et se mesure en Sievert (Sv, $1\text{Sv} = 1\text{J/kg}$). Elle évalue la façon dont le tissu est irradié selon le rayonnement (Figure 6) (49).

c) Dose efficace

La dose efficace (E, en Sv) évalue le risque à long terme pour l'individu en prenant en compte la radiosensibilité du tissu irradié et est calculée par la formule $E = H_t \times W_t$, où W_t est le facteur de pondération du tissu étudié. Pour calculer la dose efficace corps entier, il faut faire la somme de l'ensemble des E des différents tissus ($\sum (D_t \times W_r \times W_t)$) (Figure 6) (49).

C'est cette grandeur qui est utilisée dans les textes réglementaires, notamment concernant l'exposition des travailleurs.



Figure 6 : Représentation schématique des grandeurs de mesure en radiobiologie (d'après (49))

2) Effets stochastiques

Il s'agit d'effets aléatoires c'est-à-dire qu'ils surviennent de manière indépendante de la dose reçue. Les rayons X entraînent une cassure des brins d'ADN (Acide DésoxyriboNucléique) et sont responsables de mutations, à l'origine soit de néoplasie s'il s'agit de cellules somatiques, ou de mutations transmissibles s'il y a atteinte de cellules germinales (50).

La production de radicaux libres par les rayons X est à l'origine des lésions des brins d'ADN. Ainsi, une exposition qui dure dans le temps majore la probabilité de survenue de cancer car les mécanismes de réparation de l'ADN sont alors dépassés.

Toutefois, aucun effet stochastique n'a été observé en cas d'exposition inférieure à 100 mSv (dose corps entier en une unique exposition) (51).

D'autres modèles statistiques ont tenté de prédire la survenue des effets stochastiques parmi lesquels le modèle additif de risque et le modèle multiplicatif de risque (52).

Enfin, les cancers radio-induits ne sont pas spécifiques, les analyses biomoléculaires, cellulaires ou histologiques n'ayant pas retrouvé de différences vis-à-vis des cancers « spontanés », à l'inverse d'autres agents cancérigènes comme les rayons ultraviolets ou les agents alkylants (53). La fréquence des cancers spontanés augmente par ailleurs avec l'âge, le risque cumulé étant estimé à 25-30% pour une population donnée sur une vie entière (52).

3) Effets déterministes

Ces effets sont obligatoires et ils surviennent inéluctablement à partir d'un seuil de 2 Gy. Ils sont proportionnels à la dose (Tableau 1). Selon la radiosensibilité des tissus, les effets surviennent dans un ordre précis. En effet, la loi de Bergonié et Tribondeau stipule que la radiosensibilité augmente d'autant que la cellule est jeune et peu différenciée, d'où le fait que les cellules intestinales, au renouvellement accru, soient plus radiosensibles que les cellules neuronales par exemple qui sont la plupart du temps en phase G0 du cycle cellulaire (54). La Figure 7 illustre les dommages subis par la cellule lors d'une exposition aux rayonnements ionisants (55).

Tableau 1 : Effets déterministes selon la dose absorbée (d'après (56))

EFFETS DÉTERMINISTES DÉCRITS POUR DES EXPOSITIONS À DES RAYONNEMENTS GAMMA OU X	
Effets déterministes recensés	Dose d'irradiation
Diminution temporaire des spermatozoïdes	à partir de 0,15 Gy
Diminution temporaire des leucocytes (globules blancs)	à partir de 1 Gy
Atteinte oculaire : opacités du cristallin	à partir de 0,5 Gy
Nausée, asthénie Modification de la formule sanguine Effet immunodépresseur (risque d'infection) <i>Sous surveillance médicale, le retour à la normale se produit rapidement.</i>	de 1 à 2 Gy
Stérilité féminine	à partir de 2,5 Gy
Lésions cutanées	à partir de 1 Gy
Stérilité masculine définitive	5 Gy
Aplasie En l'absence de traitement, au moins la moitié des personnes irradiées meurent et il existe des risques de séquelles.	à partir de 4,5 Gy
Atteinte gastro-intestinale	4-6 Gy
Coma, mort cérébrale Mort inévitable	au-delà de 15 Gy

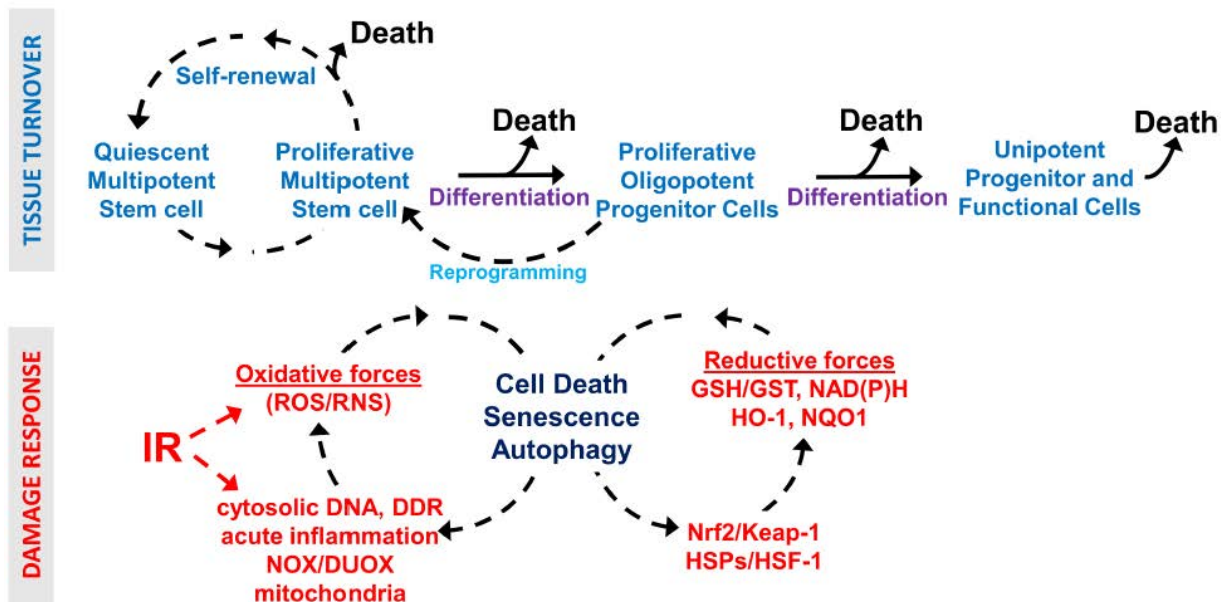


Figure 7 : Effets des rayons ionisants à l'échelle cellulaire (55)

Premier organe exposé, la peau souffre d'un érythème transitoire dès 2 Gy d'exposition au niveau de la zone située dans le faisceau primaire (Tableau 2, Figure 8) (57,58).

Tableau 2 : Effets déterministes observés sur la peau lors d'une exposition unique aux rayonnements ionisants (58)

Table 1						
Tissue Reactions from Single-Delivery Radiation Dose to Skin of the Neck, Torso, Pelvis, Buttocks, or Arms						
Band	Single-Site Acute Skin-Dose Range (Gy)*	NCI Skin Reaction Grade [†]	Approximate Time of Onset of Effects			
			Prompt	Early	Midterm	Long Term
A1	0–2	NA	No observable effects expected	No observable effects expected	No observable effects expected	No observable effects expected
A2	2–5	1	Transient erythema	Epilation	Recovery from hair loss	No observable results expected
B	5–10	1–2	Transient erythema	Erythema, epilation	Recovery; at higher doses, prolonged erythema, permanent partial epilation	Recovery; at higher doses, dermal atrophy or induration
C	10–15	2–3	Transient erythema	Erythema, epilation; possible dry or moist desquamation; recovery from desquamation	Prolonged erythema; permanent epilation	Telangiectasia [‡] ; dermal atrophy or induration; skin likely to be weak
D	>15	3–4	Transient erythema; after very high doses, edema and acute ulceration; long-term surgical intervention likely to be required	Erythema, epilation; moist desquamation	Dermal atrophy; secondary ulceration due to failure of moist desquamation to heal; surgical intervention likely to be required; at higher doses, dermal necrosis, surgical intervention likely to be required	Telangiectasia [‡] ; dermal atrophy or induration; possible late skin breakdown; wound might be persistent and progress into a deeper lesion; surgical intervention likely to be required

Note.— Applicable to normal range of patient radiosensitivities in absence of mitigating or aggravating physical or clinical factors. Data do not apply to the skin of the scalp. Dose and time bands are not rigid boundaries. Signs and symptoms are expected to appear earlier as skin dose increases. Prompt is <2 weeks; early, 2–8 weeks; midterm, 6–52 weeks; long term, >40 weeks.

* Skin dose refers to actual skin dose (including backscatter). This quantity is not the reference point air kerma described by Food and Drug Administration (21 CFR § 1020.32 [2008]) or International Electrotechnical Commission (57). Skin dosimetry is unlikely to be more accurate than ± 50%. NA = not applicable.

[†] NCI = National Cancer Institute

[‡] Refers to radiation-induced telangiectasia. Telangiectasia associated with area of initial moist desquamation or healing of ulceration may be present earlier.



Photo 2 : Érythème apparu tardivement, six semaines après une angioplastie coronarienne, la dose a été estimée à 8 Gy.

Figure 8 : Érythème dorsal post-exposition aux rayons X (57)

La cataracte radio-induite est de type sous-capsulaire postérieure. Elle peut survenir à un stade infraclinique au-delà de 5 Gy d'exposition fractionnée et entraîne un handicap visuel à partir de 8 Gy. Ainsi, la limite annuelle définie pour le cristallin par le décret du 4 juin 2018 est de 20 mSv/an ou de 100 mSv/5ans pour les travailleurs en milieu ionisant (59).

4) Exposition générale de la population française aux rayonnements ionisants

En France, la dose moyenne d'irradiation naturelle est de 4,5 mSv/an. Les rayonnements sont d'origine tellurique, gazeuse (radon), cosmique, alimentaire...

La dose artificielle pour l'ensemble de la population est d'environ 1,6 mSv/an, les examens médicaux étant la première cause (scanners et examens dentaires en premier lieu, radiographies, radiologie interventionnelle, radiothérapie) (60).

5) Indicateurs de la dose en radiologie interventionnelle

En radiologie interventionnelle endovasculaire, les indicateurs de la dose délivrée sont le Produit Dose Surface (PDS) et le Kerma dans l'air (énergie cinétique délivrée par unité de masse, « kinetic energy released per unit mass », Kair).

a) Produit Dose Surface

Il est exprimé en Gy.cm² et est considéré comme le meilleur indicateur de comparaison entre les procédures. Cet indicateur mesure la dose totale délivrée dans la surface du faisceau primaire. Il est indépendant de la distance par rapport au tube, ce qui le rend précis et fiable (61). Le PDS répond également à l'équation : $PDS \text{ (Gy.m}^2\text{)} = K_{air} \text{ (Gy)} \times \text{Surface (m}^2\text{)}$.

b) Kerma dans l'air

Il est exprimé en Gy. Il s'agit d'un paramètre ayant pour but de mesurer la dose absorbée (Dt) dans l'air, à un point précis situé dans l'axe du faisceau primaire (62). Il reflète la dose délivrée à la peau. Celle-ci est calculée à partir d'un point de référence situé à 15cm sous l'isocentre du système (61).

E. En angiographie

Les paramètres d'exposition et d'acquisition doivent être maîtrisés pour obtenir la meilleure qualité d'image permettant de répondre à l'objectif clinique tout en étant le moins irradiant possible (principe ALARA décrit ci-dessous). Ainsi, les paramètres accessibles à l'opérateur doivent être réglés : la collimation, la position du patient sur le segment tube-détecteur, la cadence image et le zoom. Certaines localisations nécessitent une apnée pendant l'acquisition (thorax, abdomen) : la coopération du patient et de l'équipe d'anesthésie-réanimation est alors primordiale afin d'obtenir des images de qualité.

IV. Cadre législatif et optimisation en radioprotection

A. Principes ALARA

Les premiers effets radio-induits ont été observés dès 1902 chez des médecins et des physiciens. C'est ainsi qu'a été créé en 1928 le Comité Internationale de Protection en Radiologie (CIPR), pour assurer une protection adéquate tout en tirant parti des bénéfices incontestables de l'utilisation des rayons X (63).

Dans le prolongement de cette démarche, dans les années 1990 émergea le principe ALARA (« As Low As Reasonably Achievable ») stipulant que la dose doit être la plus basse possible tout en permettant une image de qualité suffisante répondant à l'objectif clinique. Cette doctrine prend un cadre légal le 30 juin 1997 avec la publication de la directive européenne Euratom 97/43 indiquant que toute exposition médicale aux rayonnements ionisants doit être justifiée en fonction du risque biologique (64).

1) Les niveaux de références diagnostiques (NRD) en radiologie interventionnelle

Introduits pour la première fois en 1996 dans la publication 73 du CIPR puis remis à jour régulièrement par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) en se basant sur des centres nationaux référents, ils sont entrés depuis 2004 dans la législation française. Prolongateurs du principe ALARA, ils ont pour but d'encadrer et de promouvoir la radioprotection en radiologie diagnostique et interventionnelle, mais aussi en chirurgie et en médecine nucléaire (65).

Les NRD sont arbitrairement définis au 75^{ème} percentile de l'ensemble des mesures. « Ils constituent un outil pour l'optimisation et ne doivent pas être assimilés à des « limites de dose » ou à des « doses optimales ». Les NRD sont donc des indicateurs dosimétriques de la qualité des pratiques destinés à identifier les examens sur lesquels doivent porter prioritairement les efforts d'optimisation. Ils ne devraient pas être dépassés sans justification pour des procédures courantes » (66).

Les NRD les plus récents ont été publiés au Journal Officiel dans l'arrêté du 23 mai 2019 portant homologation de la décision n^o 2019-DC-0667 de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) du 18 avril 2019 relative aux modalités d'évaluation des doses de rayonnements ionisants délivrées aux patients (Tableau 3) (67).

En radiologie, les NRD se basent sur une référence, le PDS pour estimer la dose absorbée. La dose d'entrée ou Kerma dans l'air est également utilisé. En RI, si le PDS est dépassé, le temps de scopie est alors pris en compte. Ce dernier n'est pas corrélé au risque contrairement au Kair et au PDS, et apparait moins fiable mais peut refléter la complexité de la procédure.

En 2016, l'ISRN a publié des valeurs guides diagnostiques (VGD) situées au 50^{ème} percentile. C'est une « valeur repère à considérer, lorsque cela est techniquement possible, dans une démarche d'optimisation renforcée, sans nuire à la qualité d'image permettant d'atteindre l'objectif clinique recherché » (67).

Enfin, en RI, lorsque des NRD ne sont pas référencés pour certaines procédures, les établissements peuvent définir des niveaux de référence locaux (NRL) (68).

Dans la littérature, l'étude multicentrique d'Etard et al parue en 2017 a proposé d'établir des NRD en fonction des procédures les plus fréquentes réalisées en France. Cette étude analysait en plus le temps de scopie et le nombre d'images de graphie (69).

Tableau 3 : NRD et VGD publiés dans l'arrêté du 23 mai 2019 (67)

Actes	Niveau de référence diagnostique		Valeur guide diagnostique	
	PDS (Gy.cm ²)	Temps de scopie (min)	PDS (Gy.cm ²)	Temps de scopie (min)
Coronarographie	38	6	21	4
Angioplastie des artères coronaires*	80	15	45	10
Artériographie cérébrale (trois axes ou plus)	105	13	65	8
Embolisation d'un anévrisme cérébral	190	58	130	37
Embolisation d'une malformation artério-veineuse cérébrale	285	68	170	45
Chimio-embolisation hépatique	240	27	115	18
Embolisation des artères bronchiques	135	38	70	25
Embolisation d'un fibrome utérin	130	29	55	20
Embolisation d'une hémorragie de la délivrance	295	25	170	15
Shunt porto-systémique intrahépatique (TIPS)	190	39	95	25
Drainage biliaire avec pose de prothèse, par voie transcutanée	45	18	20	11
Vertébroplastie (un étage vertébral)	60	9	30	6

* sauf pour occlusion totale chronique (OTC)

2) Bonnes pratiques de la radioprotection en radiologie interventionnelle

Les paramètres d'exposition durant la procédure doivent être connus et réglés en permanence par l'opérateur. Ainsi, la scopie pulsée doit être préférée à la scopie continue. L'utilisation du zoom doit être limitée au strict nécessaire : en effet, un zoom par deux multiplie la dose par huit car en diminuant la surface, il y a une concentration de la même dose de photons sur une surface plus réduite.

La position du patient est essentielle : il doit être placé le plus loin possible du tube et le plus proche possible du détecteur. Cela limite le rayonnement diffusé que subit l'opérateur et améliore la qualité de l'image.

La cadence image est réglée de telle sorte que la plus basse cadence possible parvienne à maintenir un confort visuel à l'opérateur en permettant une conservation de la fluidité de l'image afin d'éviter l'asynchronisme affichage/geste : la cadence sera augmentée en cas de nécessité de détails précis dans le temps, par exemple lors de l'injection de cyanoacrylate. Au contraire, elle sera diminuée pendant une navigation standard dans des vaisseaux de gros calibre.

La collimation permet de limiter le faisceau incident à la seule zone anatomique utile au moment du geste, et ajustée par la suite. Elle permet en outre à l'opérateur proche du patient si nécessaire de placer ses mains plus à proximité (par exemple lors d'une néphrostomie, un drainage, ajustement de l'introducteur...).

L'utilisation d'incidences oblique ou de profil augmente l'irradiation du fait de l'épaisseur plus importante à traverser. Elle doit être limitée autant que possible.

B. Radioprotection des travailleurs en RI

Les obligations de certification en radioprotection personnel et patient permettent ainsi de travailler selon les bonnes pratiques cliniques basées sur l'évolution de la technologie et des connaissances en biophysique, essentielles pour maintenir la dose la plus basse possible.

La réglementation des travailleurs de catégories A et B est présentée dans le Tableau 4. Afin de respecter cette réglementation issue du Code du Travail, la connaissance des gestes et la mise en place de bonnes pratiques sont nécessaires, en particulier en salle d'angiographie. Ainsi, les outils d'indicateurs de dose sont obligatoires (59).

En outre, l'opérateur est tenu de porter un tablier de 0,35 mm d'équivalent plomb s'il est à plus d'un mètre du patient et de 0,55 mm s'il est à moins d'un mètre. Le port de la bague est optionnel. Le port de lunettes plombées est recommandé (59).

Tableau 4 : Limites réglementaires pour les travailleurs exposés (59)

Grandeur de protection	Travailleur de catégorie A	Travailleur de catégorie B et jeune travailleur de 16 à 18 ans	Femme enceinte (grossesse déclarée)	Femme allaitant	
	(mSv sur 12 mois)	(mSv sur 12 mois)			
Dose efficace [§]	20	6			
Dose équivalente *	mains, avant-bras, pieds et chevilles	500	150	l'exposition de l'enfant à naître doit rester inférieure à 1 mSv	ne doit pas être soumise à un risque d'exposition interne
	peau #	500	150		
	cristallin	150	45		

[§] Exposition externe et interne

* Exposition externe

Applicable sur toute surface de 1 cm²

Les gestes d'hémostases par voie endovasculaire sont des procédures dites éloignées notamment lorsque l'on utilise une voie fémorale, la main de l'opérateur ne se trouve donc pas dans le faisceau primaire à l'état normal (à l'inverse des gestes par ponction percutanée directe pour lesquels les mains de l'opérateur sont très proches de la zone anatomique à traiter).

L'opérateur principal doit se tenir face au tube quand celui-ci est de profil afin de limiter le rayonnement diffusé. La taille du champ est essentielle. En effet, la diminution du champ augmente la dose reçue par le patient mais a contrario, augmenter la taille du champ augmente le débit de dose par majoration du rayonnement diffusé. Le meilleur compromis est donc de travailler avec un champ large, pour le patient, et une collimation optimale pour l'opérateur.

Le morphotype du patient influe également sur la dose reçue par l'opérateur, par augmentation du rayonnement diffusé. Le paravent plombé et les équipements de protection individuels (EPI) sont d'autant plus importants.

Lorsque des images de graphie sont faites, l'opérateur doit s'éloigner le plus possible du patient, voire sortir de la salle et/ou aller aux côtés du manipulateur à la console, protégée par une vitre plombée. On rappelle que la dose reçue diminue avec le carré de la distance (59,70).

C. Dose Archiving and Communication System (DACs)

Un DACs, à l'instar d'un PACS (Picture Archiving and Communication System), permet l'archivage automatisé des doses délivrées aux patients lors d'une exposition médicale aux rayonnements ionisants. Il est utilisé aussi bien en imagerie diagnostique qu'interventionnelle (71).

Avec ce répertoire, il est possible pour un centre de régulièrement analyser les doses pour optimiser les protocoles d'acquisition d'image et de comparer les différentes procédures toujours en vue de répondre aux principes ALARA.

Au CHU de Lille, c'est le logiciel DoseWatch® (General Electric Healthcare Systems, Buc, France) qui est connecté à la console d'acquisition de la salle hybride des urgences de l'hôpital Roger Salengro depuis le 21 février 2019. Il permet une collection et un suivi automatiques des doses. Il est donc supposé renforcer la qualité du recueil pour des études observationnelles transversales et longitudinales en radioprotection (72).

V. Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est d'estimer les doses absorbées via le recueil du PDS et du Kair pendant les gestes d'hémostase en urgence réalisés par l'astreinte de radiologie interventionnelle au CHU de Lille dans la salle hybride des urgences de l'hôpital Roger Salengro. Cette analyse descriptive permettra de répondre aux recommandations nationales et européennes en établissant les NRD et VGD locaux.

MATERIEL ET METHODES

I. Caractéristiques de l'étude

Il s'agissait d'une étude rétrospective, observationnelle, monocentrique (CHU de Lille, hôpital Roger Salengro).

A. Population

Tous les patients ayant subi une procédure de radiologie interventionnelle d'hémostase d'urgence entre le 7 avril 2015 et le 1^{er} octobre 2020 ont été inclus. Seuls les patients traités dans la salle hybride située dans le service des urgences de l'hôpital Roger Salengro ont été pris en compte.

Les patients n'ayant pas été pris en charge par l'astreinte de radiologie (chirurgie vasculaire) ceux n'ayant pas bénéficié d'une procédure par voie endovasculaire (pose de néphrostomie par exemple) et les patients pris en charge en urgence sur un autre équipement que la salle hybride des urgences de l'hôpital Roger Salengro n'ont pas été inclus.

Les patients pour lesquels les images ou le compte-rendu interventionnel n'étaient pas disponibles ont été exclus.

B. Équipement angiographique

Cette salle d'angiographie du bloc des urgences de l'hôpital Roger Salengro au CHU de Lille est équipée d'un système à capteur plan Innova IGS 530® (General Electric Systems, Buc, France) mis en service le 6 avril 2015. L'environnement répond aux exigences permettant la chirurgie ouverte.

Un contrôle de qualité interne est réalisé tous les trois mois et un contrôle de qualité externe est assuré par une société agréée tous les ans.

II. Recueil des données

Le recueil a été réalisé par un unique observateur en ouvert. Après anonymisation, l'âge au jour de la prise en charge, le poids (en kg) et la taille (en m) ont été recueillis à partir du système d'information du CHU de Lille via le logiciel Sillage® (SIB, Rennes, France). L'indice de masse corporelle (IMC) a été calculé à partir de ces deux dernières variables. L'indication de la prise en charge radiologique, la nature et le nombre de vaisseaux ciblés, les DMI utilisés, les incidences de travail (face : de 0 à 5 degrés, oblique : de 5 à 45 degrés, profil : > 45 degrés), le Kair (en mGy), le nombre d'images de graphies par intervention, ont été recueillies d'après le PACS. Les incidences ont été recueillies selon des variables qualitatives sans préjuger de leur prédominance les unes par rapport aux autres pendant les procédures. Le PDS (en mGy.cm²) et le temps de scopie (en minutes) ont été obtenus via le registre manuscrit tenu par les manipulateurs en électroradiologie affectés à la salle hybride.

Durant cette période, l'équipe de l'astreinte se composait de 22 séniors. Dans un souci de simplification de l'analyse, seuls les six opérateurs ayant réalisé le plus de procédures ont été individualisés, puis anonymisés en leur attribuant aléatoirement une lettre de l'alphabet. Le reste des opérateurs ont été rassemblés dans une catégorie « Autres ».

A partir du 21 février 2019, les relevés dosimétriques et les paramètres morphologiques du patient étaient en plus recueillis avec le logiciel DoseWatch® (General Electric Healthcare Systems, Buc, France).

Dans un souci de continuité du recueil réalisé manuellement depuis 2015, l'observateur a en plus poursuivi le recueil manuel en récupérant les données par les

différents supports sus-cités, afin de comparer la qualité des données par les deux méthodes.

L'ensemble des données a été rassemblé au sein d'un fichier Excel® (Microsoft Corporation, Albuquerque, Nouveau-Mexique, États-Unis) protégé par un mot de passe et enregistré sur un ordinateur institutionnel lui-même protégé par un accès nominatif.

L'étude a été approuvée par le Comité d'Éthique pour la Recherche en Imagerie Médicale (CERIM) sous le numéro IRB suivant : CRM-2108-192.

III. Analyse statistique

Dans un premier temps, les caractéristiques de l'échantillon ont été résumées au moyen de statistiques descriptives : les variables qualitatives ont été exprimées en effectif et proportion, les variables quantitatives en médiane et écart interquartile.

La distribution des valeurs du PDS et du Kair selon le type d'intervention a été représentée graphiquement au moyen d'histogrammes avec la médiane et l'écart interquartile (*inter quartile range*, IQR).

A partir du 75^{ème} percentile du PDS défini pour chaque type d'intervention (constituant chacun un sous-groupe), une nouvelle variable qualitative a été créée pour chaque patient afin de représenter la présence ou l'absence de dépassement du 75^{ème} percentile, avec deux modalités « oui » et « non ».

Lorsque l'effectif des sous-groupes le permettait, une analyse bivariée a été effectuée selon le statut du patient ($PDS \leq 75^{\text{ème}}$ percentile ou $> 75^{\text{ème}}$ percentile) au moyen du

test du chi2 ou du test de Fisher pour les variables qualitatives, et du test de Wilcoxon pour les variables quantitatives afin d'identifier les facteurs de risque de dépassement du 75^{ème} percentile du PDS. Dans un premier temps, les variables pour lesquelles la valeur de $p < 0,20$ ont ensuite été incluses dans une nouvelle analyse par régression logistique afin d'identifier les variables susceptibles d'être associées de manière statistiquement significative à un dépassement du 75^{ème} percentile du PDS ($p < 0.05$).

La même analyse a également été réalisée pour l'ensemble de la population ($n = 1422$), indépendamment du type de geste en retirant les groupes « polytraumatisme », « pédiatrie » et « membres » du fait de procédures trop hétérogènes.

Les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel R[®] (R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche). Les données manquantes ont été considérées comme « Missing At Random », et aucune technique d'imputation n'a été utilisée, au vu de la nature exploratoire des analyses.

Le seuil de significativité statistique a été fixé pour les valeurs de $p < 0,05$.

RESULTATS ET DISCUSSION

I. Description de la population de l'étude

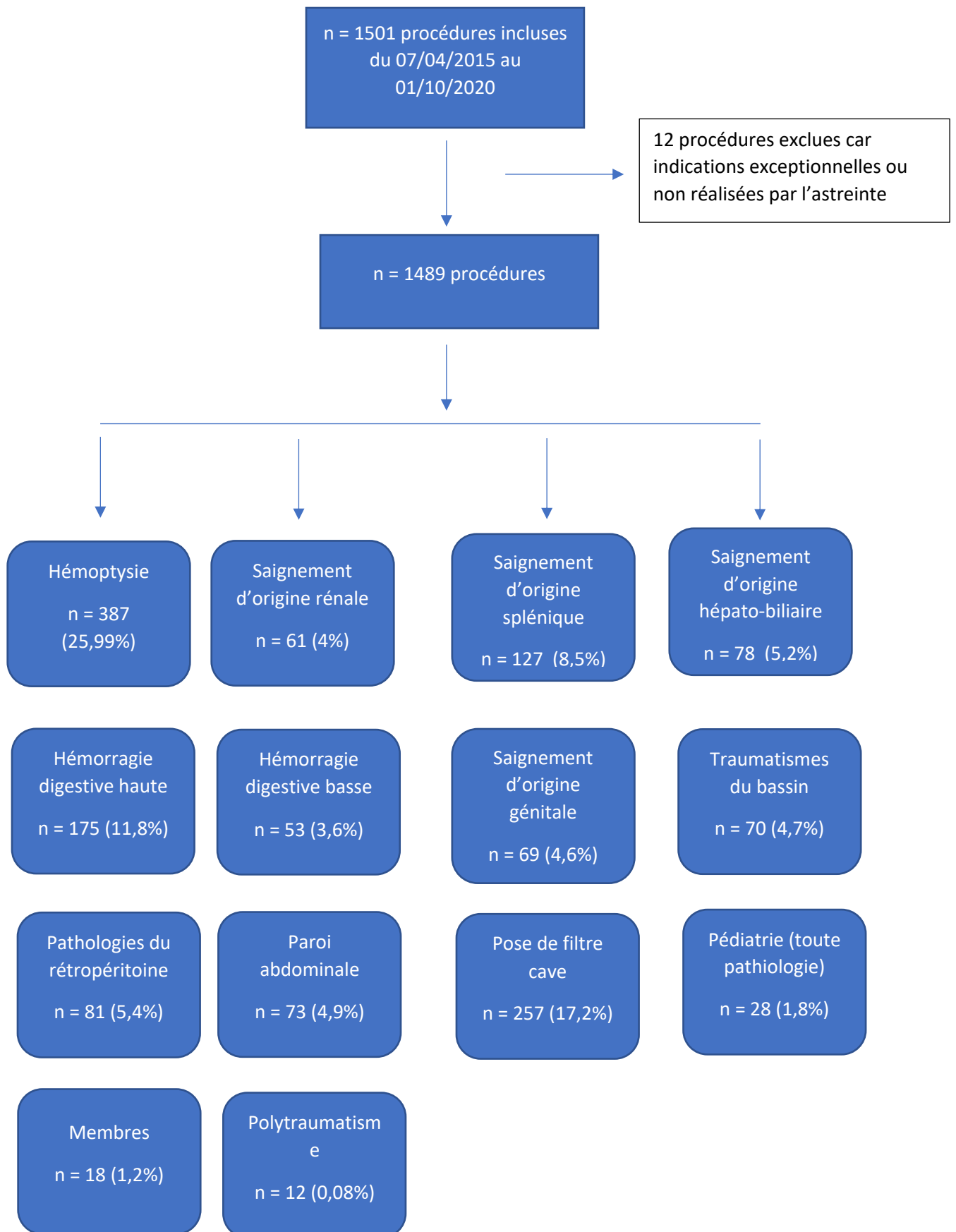


Figure 9 : Flow chart de l'échantillon

II. Sous-groupe « hémoptysie »

A. Résultats

1) Distribution du PDS et du Kair

Ce sous-groupe contenait n = 387 procédures. Toutes les causes d'hémoptysie étaient prises en compte.

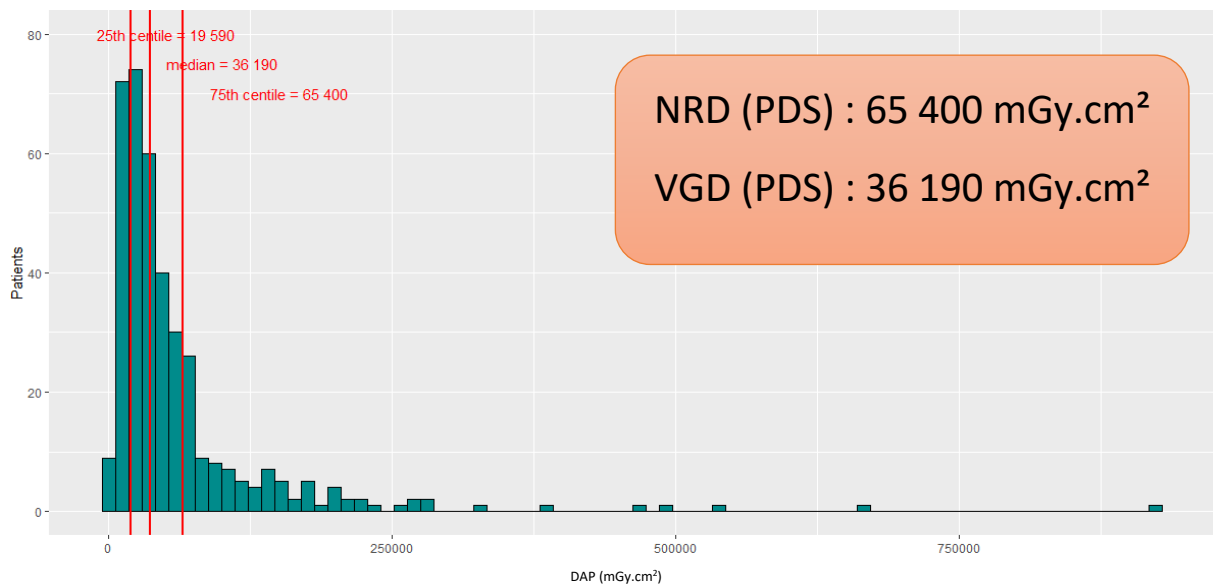


Figure 10 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « hémoptysie » (n = 385)

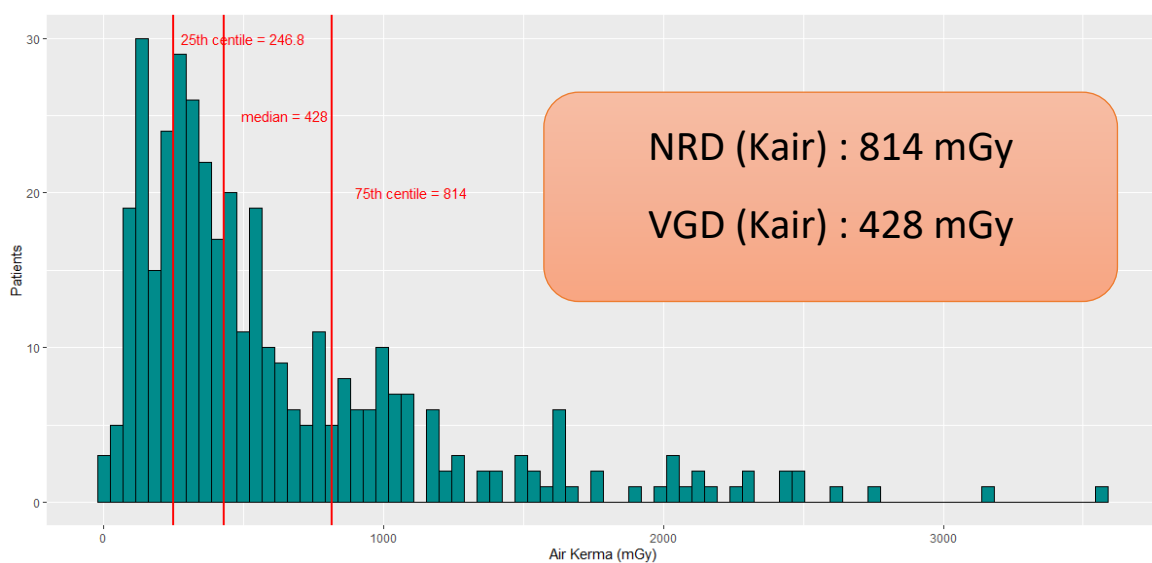


Figure 11 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « hémoptysie » (n = 380)

A noter que 30 hémoptysies (7,8%) étaient d'origine artérielle pulmonaire. Le PDS médian était de 41 290 mGy.cm² (IQR : 16 935 – 102 582) et le Kair médian de 416 mGy (IQR : 180 – 1 001).

2) Analyse bivariée selon le PDS

Le Tableau 5 présentait l'analyse bi-variée selon le PDS en prenant pour seuil le 75^{ème} percentile.

Tableau 5 : Analyse bi-variée selon le PDS

Caractéristiques	Échantillon, N = 385 ¹	< 75 ^{ème} percentile, N = 289 ¹	> 75 ^{ème} percentile, N = 96 ¹	p ²
Temps d'intervention				0.4
Jour	208 (54%)	160 (55%)	48 (50%)	
Nuit	177 (46%)	129 (45%)	48 (50%)	
Genre				0.004
F	80 (21%)	70 (24%)	10 (10%)	
M	305 (79%)	219 (76%)	86 (90%)	
Age (années)	60 (49, 69)	58 (49, 68)	64 (55, 70)	0.006
IMC (kg/m²)	23.8 (20.9, 27.8)	23.5 (20.6, 26.9)	26.0 (22.5, 28.7)	0.004
Données manquantes	81	58	23	
Opérateur				<0.001
C	81 (21%)	60 (21%)	21 (22%)	
J	27 (7.0%)	23 (8.0%)	4 (4.2%)	
M	36 (9.4%)	19 (6.6%)	17 (18%)	
P	33 (8.6%)	25 (8.7%)	8 (8.3%)	
U	35 (9.1%)	33 (11%)	2 (2.1%)	
W	39 (10%)	23 (8.0%)	16 (17%)	

Autres	134 (35%)	106 (37%)	28 (29%)	
Temps de scopie (minutes)	29 (19, 40)	26 (17, 34)	41 (32, 58)	<0.001
Données manquantes	19	12	7	
Images de graphie	95 (61, 146)	88 (55, 120)	149 (88, 241)	<0.001
Utilisation de la 3D	9 (2.3%)	3 (1.0%)	6 (6.2%)	0.009
Incidence de face	379 (98%)	284 (98%)	95 (99%)	>0.9
Incidence oblique	106 (28%)	66 (23%)	40 (42%)	<0.001
Incidence de profil	14 (3.6%)	9 (3.1%)	5 (5.2%)	0.4
Collimation	289 (75%)	234 (81%)	55 (57%)	<0.001
Zoom	264 (69%)	194 (67%)	70 (73%)	0.3
¹ n (%) ; Médiane (IQR)				
² Test du Chi ² de Pearson; test de la somme des rangs de Wilcoxon; test exact de Fisher				

Dans ce tableau sans ajustement, on constatait que les variables associées à un dépassement du 75^{ème} percentile avec un seuil $p < 0,2$ étaient :

- Le sexe masculin ($p < 0,004$).
- Un âge élevé ($p < 0,006$).
- Un IMC élevé ($p < 0,004$).
- L'opérateur P était associé à un risque plus élevé de dépassement du seuil ($p < 0,001$) par rapport aux autres opérateurs, en considérant l'opérateur C pour référence global, ce dernier ayant été arbitrairement défini comme référence car ayant réalisé le plus de gestes ($n = 253$ procédures, 17%).
- Un temps de scopie élevé ($p < 0,001$).
- Un nombre d'images de graphies important ($p < 0,001$).
- La réalisation d'une acquisition volumique ($p < 0,009$).
- L'incidence de travail en oblique a été utilisée chez 40 patients ($p < 0,001$).

L'utilisation de la collimation semblait en revanche être un facteur protecteur ($p < 0,001$).

3) Analyse multivariée

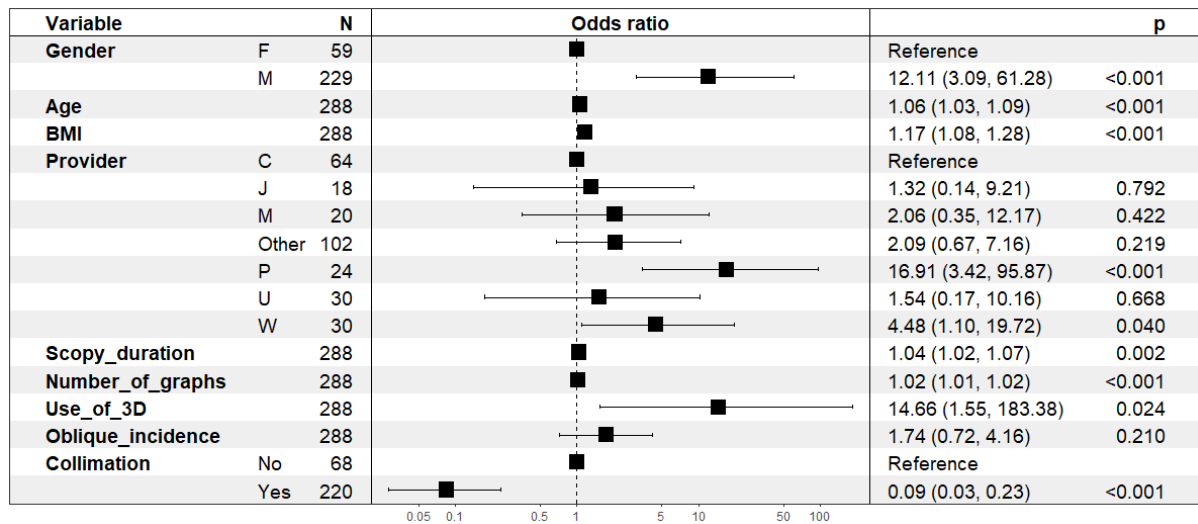


Figure 12 : Résultats de l'analyse multivariée (régression logistique)

Après ajustement, on constatait que les variables associées de manière statistiquement significative à un dépassement du 75^{ème} percentile étaient ($p < 0,05$) :

- Le sexe masculin ($p < 0,001$).
- L'âge ($p < 0,001$).
- L'IMC ($p < 0,001$).
- L'opérateur P ($p < 0,001$).
- Le temps de scopie ($p = 0,002$).
- Le nombre d'images de graphie ($p < 0,001$).
- L'utilisation d'acquisition volumique ($p = 0,024$).

A l'inverse, l'utilisation d'une collimation a été identifiée de manière statistiquement significative comme un facteur protecteur de dépassement du seuil ($p < 0,001$).

Les autres variables n'étaient pas associées de manière significative à un dépassement du 75^{ème} percentile.

B. Discussion

Le sous-groupe « hémoptysie » était celui comportant le plus grand nombre de procédures parmi l'ensemble de l'échantillon (25,99%). Cet effectif a permis la réalisation d'une analyse multivariée avec ajustement afin de dégager les facteurs de risque de dépassement du NRD.

L'analyse du PDS dans ce sous-groupe a révélé un 75^{ème} percentile égal à 65,4 Gy.cm² et l'analyse du Kair un 75^{ème} percentile à 0,81 Gy. Le NRD promulgué pour l'embolisation des artères bronchiques est de 135 Gy.cm², la VGD est de 70 Gy.cm². Notre sous-groupe mettait en évidence un NRD local en-dessous de la VGD.

Ceci peut être expliqué par le grand nombre de patients traités, et donc une plus grande expérience des opérateurs. Le respect des mesures de radioprotection explique également une valeur plus basse que la moyenne nationale. Ainsi, l'échantillon « bronchial artery embolization » comportait 163 procédures et affichait un 75^{ème} percentile à 131,4 Gy.cm² pour le PDS et à 0,827 Gy pour le Kair. L'étude de Miller et al parue en 2009 portant sur 27 procédures dans le sous-groupe « bronchial artery embolization » avait un 75^{ème} percentile de 159,7 Gy.cm² et un Kair de 1,3 Gy (73). Là encore, notre population se situait en-dessous des résultats publiés en termes de PDS. Cependant, il est à noter que le déroulement de la procédure, notamment le nombre d'artères traitées, n'était pas précisé, ce qui pourrait expliquer une variation dans le temps de scopie et donc de la dose absorbée.

Le Kair était globalement identique en comparaison avec ces études montrant ainsi un réglage adapté du tube en termes d'émission de rayonnements.

A titre indicatif, la série de Miller et al disposait d'un sous-groupe de 104 procédures sur les angiographies pulmonaires (73). Les 75^{èmes} percentiles du PDS et du Kair étaient à 61,76 Gy.cm² et à 0,293 Gy respectivement. Il n'était pas précisé l'indication exacte de ces angiographies, elles auraient pu être à visée diagnostique ou interventionnelle. Le NRL du PDS de notre sous-groupe se situait bien au-dessus de celui de cette étude, contrastant avec un NRL du Kair dans le même ordre. Ceci peut être expliqué par une insuffisance d'utilisation de la collimation de notre équipe, augmentant ainsi la surface d'exposition « inutile » à la procédure.

Concernant notre analyse multivariée, l'âge et le sexe masculin ne sont pas connus dans la littérature pour être des facteurs de risque direct de dépassement du seuil et peuvent être des facteurs confondants potentiels.

En effet, ces deux variables sont des facteurs de risque d'athérosclérose : la navigation et le cathétérisme peuvent par conséquent être pris en défaut et donc allonger la procédure. De plus, ces patients ont souvent un terrain préférentiel pour le tabagisme et donc une hypervascularisation systémique bronchique et/ou non bronchique, pouvant alors entraîner un traitement de plusieurs artères, compliquant potentiellement la procédure. Cependant, afin d'étayer cette hypothèse, il importerait éventuellement dans un premier temps d'analyser le temps de scopie chez ces patients par rapport aux autres afin de pouvoir en affirmer le caractère causal. Ceci n'a pas été réalisé dans notre étude étant donné que le NRD local ne dépassait pas le NRD promulgué, cependant une étude dédiée plus approfondie à l'avenir pourrait être réalisée.

Ensuite, on constatait que le temps de scopie, l'IMC, le nombre d'images de graphie sont corrélés significativement à un dépassement du seuil, mais sont déjà des facteurs de risque bien connus dans la littérature (58). En effet, ils sont associés à une exposition plus importante aux rayons X. L'opérateur P qui était également associé à

un surrisque de dépassement peut refléter une certaine variabilité inter-opérateur. Une action ciblée pourra être entreprise au moyen de staff pédagogique de sensibilisation à la radioprotection avec l'ensemble de l'équipe afin de diminuer cette variabilité inter-opérateur.

Enfin, les limites de cette analyse résidaient dans le manque de données de la variable IMC qui n'était pas disponible chez $n = 81$ patients (21 %), et l'absence d'imputation réalisée.

III. Saignement d'origine hépato-biliaire

Ce sous-groupe contenait $n = 78$ procédures.

A. Résultats

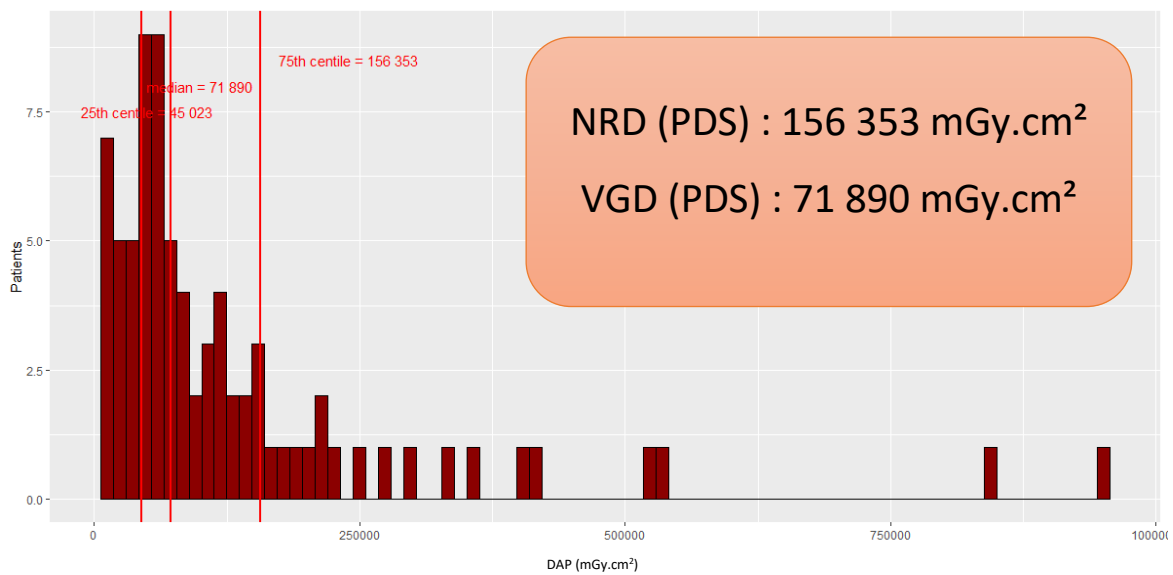


Figure 13 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « saignement d'origine hépato-biliaire »

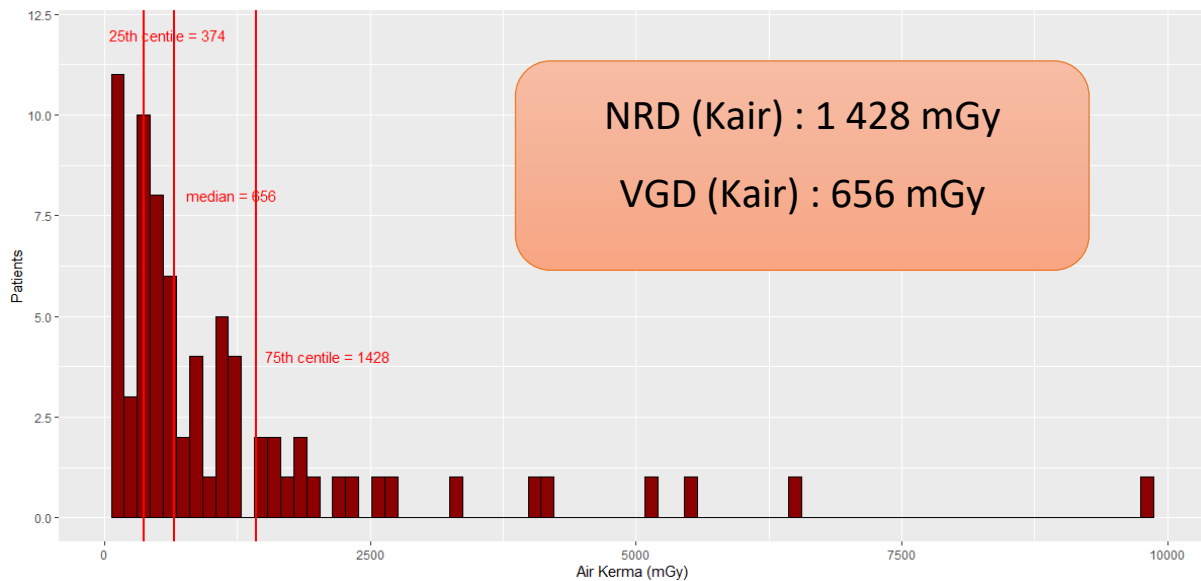


Figure 14 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « saignement d’origine hépatobiliaire » (n = 73 procédures)

B. Discussion

Il s’agit d’un sous-groupe hétérogène en termes d’indications mais techniquement homogène, la méthode d’embolisation a peu différé dans cette cohorte. Les lésions post-traumatiques, les causes tumorales et les lésions post-opératoires représentaient les principales indications.

A titre comparatif, le NRD publié en 2019 concernait les chimio-embolisations hépatiques où il était de 240 Gy.cm², la VGD était de 115 Gy.cm². Dans les chimio-embolisations, l’agent utilisé est le plus souvent une solution à base d’Epirubicine mélangée à de l’huile iodée dans les carcinomes hépato-cellulaires, ou des microparticules pour les lésions secondaires. En urgence, un saignement hépatique est traité en fonction de la présentation par de la gélatine résorbable, des coils voire de la colle biologique.

Cependant, quel que soit le type d'agent utilisé, la navigation et le cathétérisme sont similaires, l'embolisation étant plus ou moins sélective selon les anomalies rencontrées.

Ainsi, le 75^{ème} percentile de notre échantillon se situe en deçà du NRD mais au-dessus de la VGD. Les facteurs spécifiques à ce sous-groupe susceptibles d'être associés à un dépassement de la médiane peuvent être un cathétérisme supra-sélectif rallongeant la durée de la procédure ou des variantes anatomiques compliquant le cathétérisme.

La série de Heilmaier et al parue en 2016 a regroupé les embolisations se déroulant au sein de la cavité abdominale dans la catégorie « visceral artery embolization » (74).

Cette série se dichotomisait en procédures standards (n = 15) et procédures difficiles (n = 20). Les 75^{èmes} percentiles du PDS étaient respectivement de 164,5 Gy.cm² et de 425,8 Gy.cm². Les 75^{èmes} percentiles du Kair étaient respectivement de 1,72 Gy et de 4,58 Gy.

La série d'Etard et al portant sur 397 procédures dans le sous-groupe « hepatic chemoembolization » retrouvait un 75^{ème} percentile à 249,2 Gy.cm² pour le PDS et à 0,987 Gy pour le Kair (69).

Le sous-groupe de notre étude se situait en-dessous des 75^{èmes} percentiles présentés ci-dessus sauf pour le Kair de la série d'Etard et al. En reprenant le rapport entre le PDS et le Kair, on pouvait supposer que notre équipe utilisait une collimation plus optimisée, ceci diminuant donc la surface d'irradiation.

Là encore, un regroupement en un unique sous-groupe portant sur les embolisations des artères viscérales apparaît vaste, les procédures pouvant être plus ou moins complexes selon les cibles à traiter.

IV. Hémorragie digestive haute

Ce sous-groupe contenait n = 175 procédures.

A. Résultats

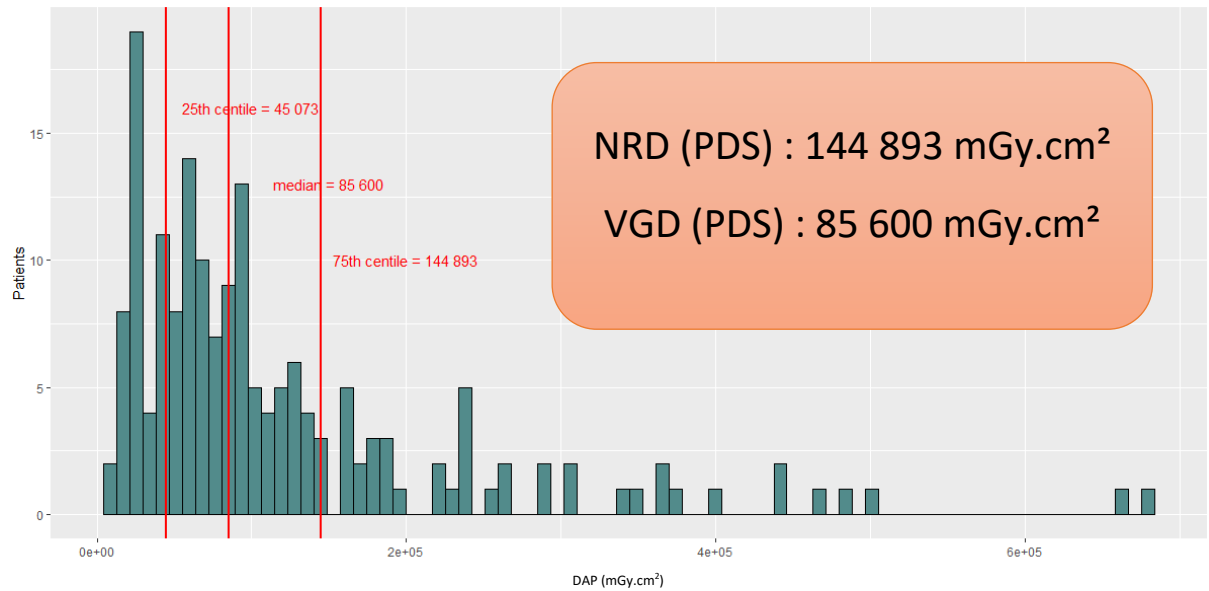


Figure 15 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « hémorragie digestive haute »

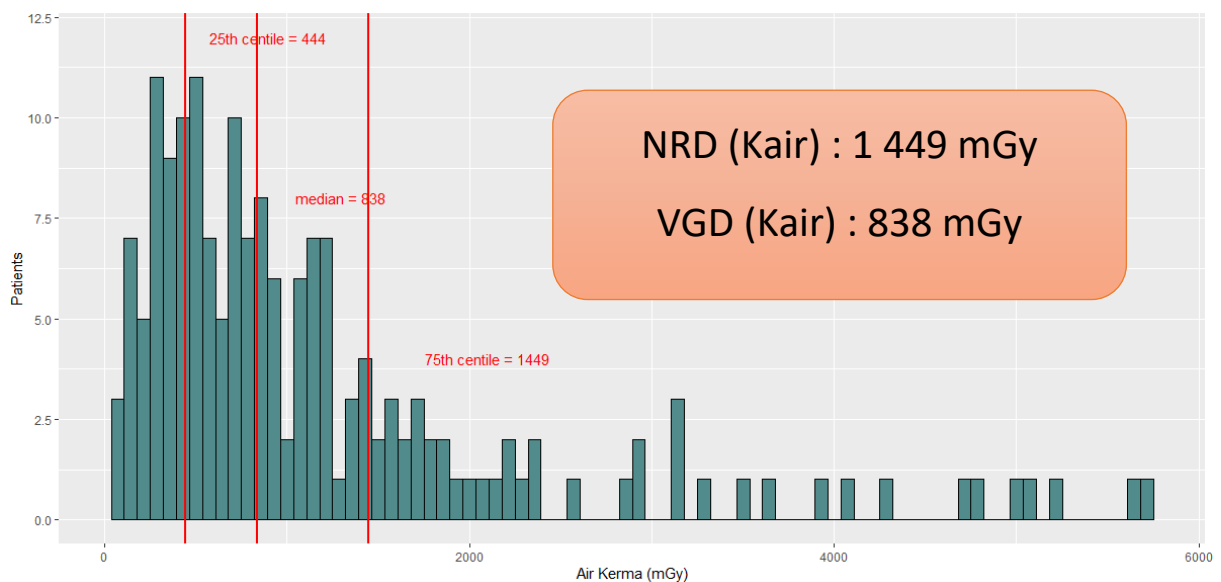


Figure 16 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « hémorragie digestive haute » (n = 172 procédures)

B. Discussion

Ce sous-groupe hétérogène en termes d'indications contenait les ulcères gastro-duodénaux hémorragiques, les saignements d'origine pancréatique qu'ils surviennent dans un contexte post-opératoire ou de pancréatite. L'artère gastro-duodénale et les arcades duodéno-pancréatiques sont les principales cibles des embolisations en urgence et représentent une typologie d'actes techniquement relativement homogènes.

La série de Heilmaier et al présentait des 75^{èmes} percentiles du PDS à 164,53 Gy.cm² et à 425,82 Gy.cm² pour les procédures « standards » et « difficiles » dans son sous-groupe « visceral artery embolization ». Les 75^{èmes} percentiles du Kair se situaient à 1,72 Gy et 4,58 Gy (74).

La série de Miller et al portant sur 94 procédures dans le sous-groupe « gastrointestinal haemorrhage localization and treatment » affichait un 75^{ème} percentile du PDS à 319,15 Gy.cm² et un Kair à 2,056 Gy (73).

Le sous-groupe de notre étude se situait en-dessous des 75^{èmes} percentiles du PDS et du Kair présentés dans ces études, soulignant ainsi l'optimisation des mesures de radioprotection de notre équipe.

V. Hémorragie digestive basse

Ce sous-groupe contenait n = 53 procédures.

A. Résultats

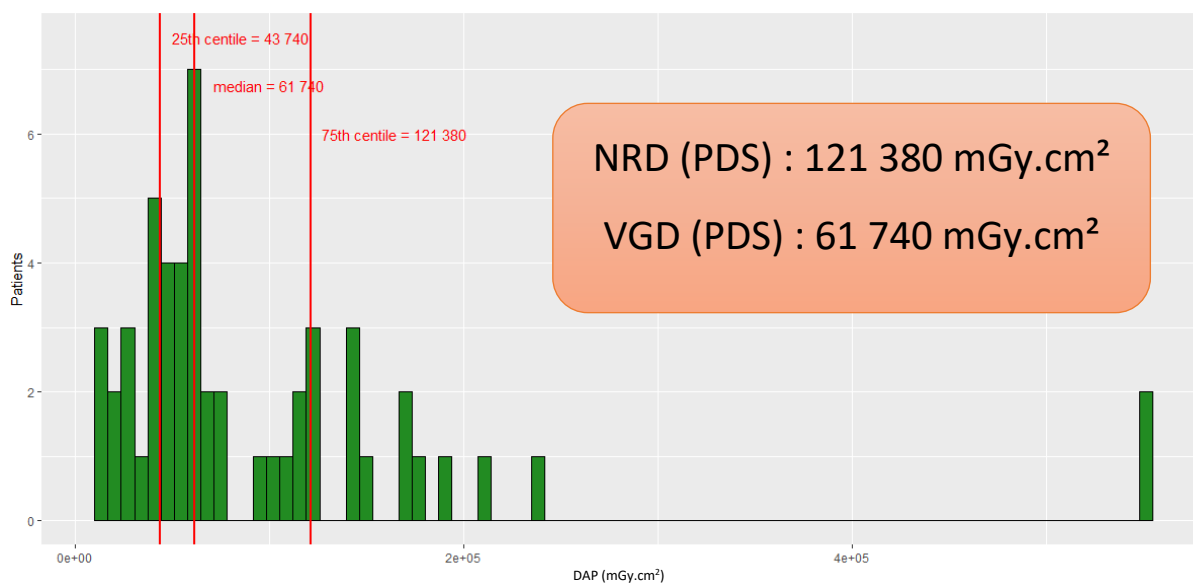


Figure 17 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « hémorragie digestive basse »

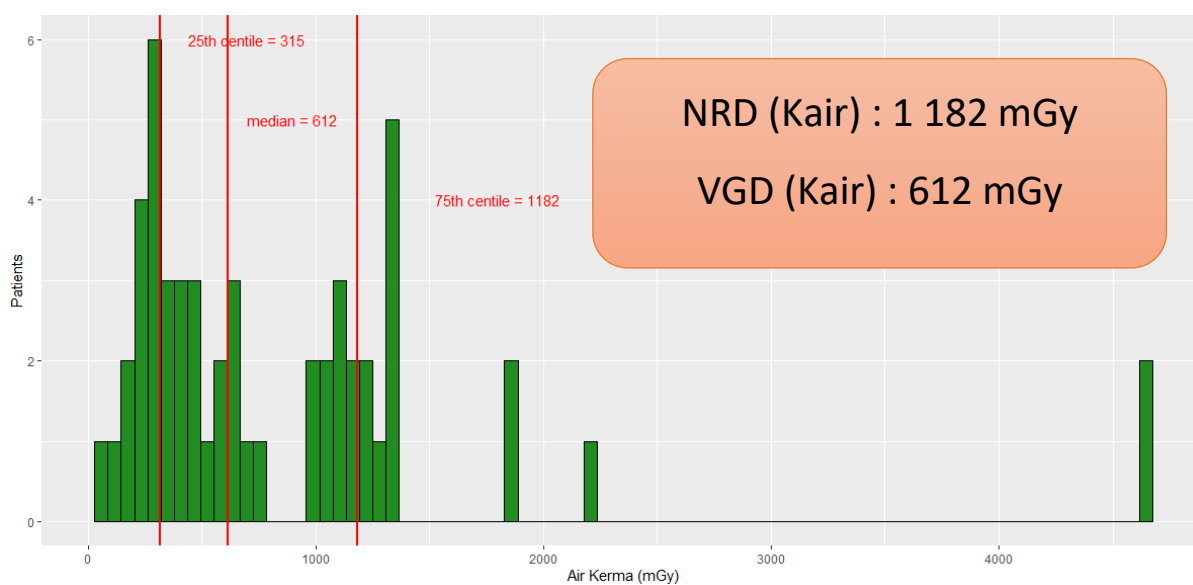


Figure 18 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « hémorragie digestive basse »

B. Discussion

Ce sous-groupe à l'échantillon, plus réduit que les précédents, contenait majoritairement les saignements d'origine colo-grêliques. Les cibles traitées étaient donc essentiellement les artères à visée digestive, avec un cathétérisme sélectif.

Dans la littérature, les séries de Heilmaier et al. et de Miller ont été citées dans les paragraphes ci-dessus avec leurs sous-groupes respectifs « visceral artery embolization » et « gastrointestinal haemorrhage localization and treatment » (73,74).

Notre sous-groupe se situait en-dessous de ces niveaux publiés.

VI. Saignement d'origine rénale

Ce sous-groupe contenait n = 61 procédures.

A. Résultats

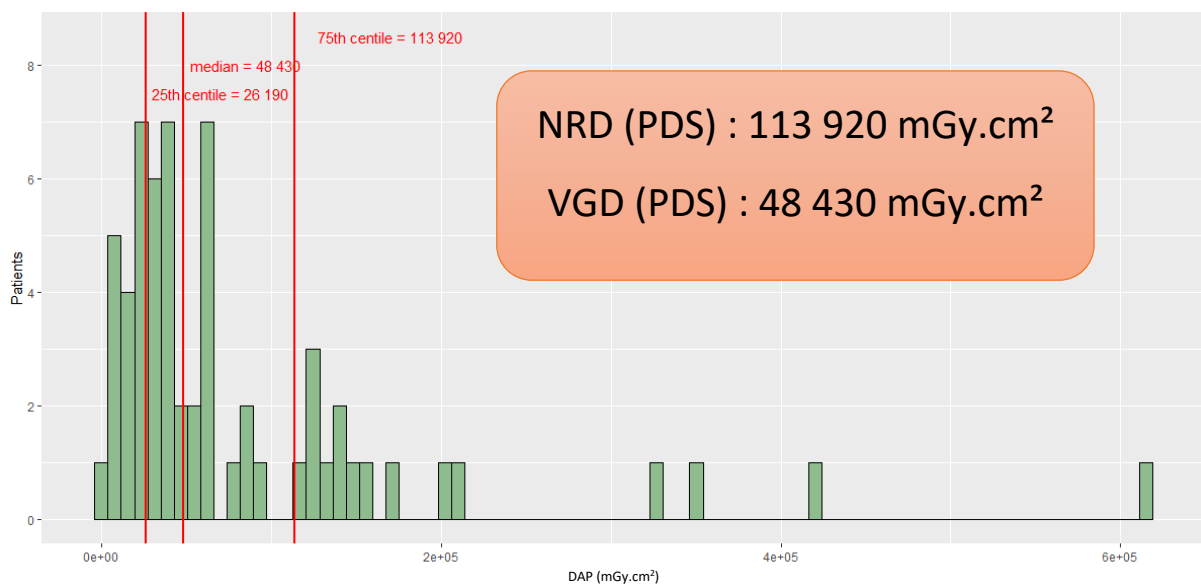


Figure 19 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « saignement d'origine rénale »

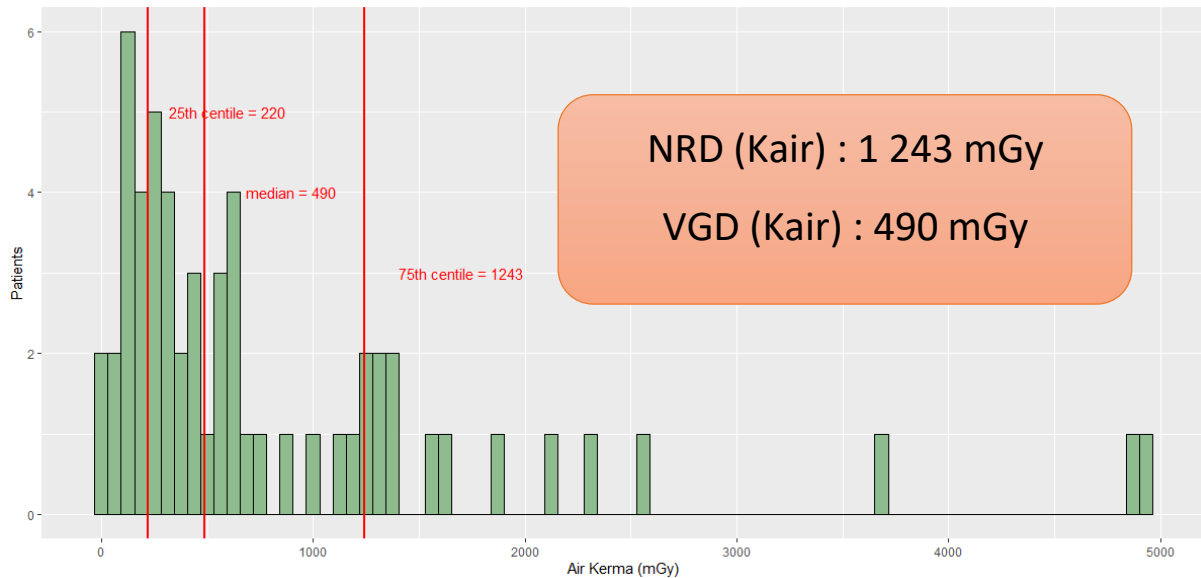


Figure 20 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « saignement d'origine rénale »
(n = 57 procédures)

B. Discussion

Les embolisations des artères rénales ont pu être sélectives ou non dans notre cohorte en fonction du contexte, induisant des procédures plus ou moins rapides. Il s'agit donc d'un groupe techniquement plus hétérogène.

Dans la série de Etard et al, on retrouvait un 75^{ème} percentile du PDS à 322,6 Gy.cm² et du Kair à 1,69 Gy pour 42 procédures. La série de Heilmaier et al quant à elle affichait un 75^{ème} percentile du PDS et du Kair de 102,1 Gy.cm² et 191,2 Gy.cm², et de 1,44 Gy et 2,86 Gy, pour un échantillon de six procédures dans les sous-groupes « standards » et « difficiles » (69,74).

Notre sous-groupe présentait des 75^{èmes} percentiles en dessous de la série d'Etard et al, mais légèrement au-dessus du sous-groupe « procédures standards » de la série de Heilmaier pour le PDS. Ces études ne précisait pas si les embolisations étaient sélectives ou tronculaires, ne permettant donc qu'une comparaison globale entre les groupes.

VII. Saignement d'origine rétro-péritonéale

Ce sous-groupe contenait n = 81 procédures.

A. Résultats

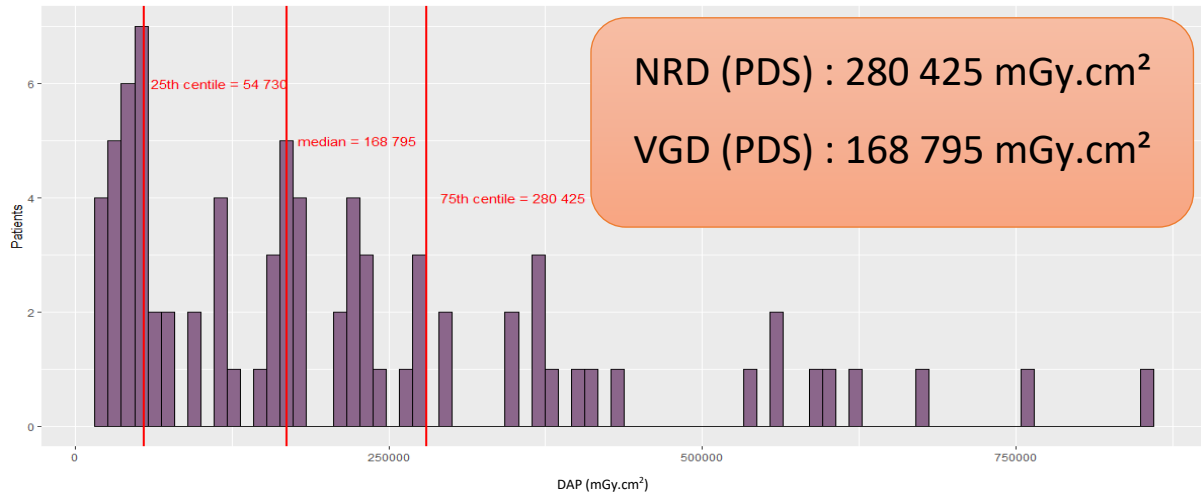


Figure 21 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « saignement d'origine rétro-péritonéale » (n = 80 procédures)

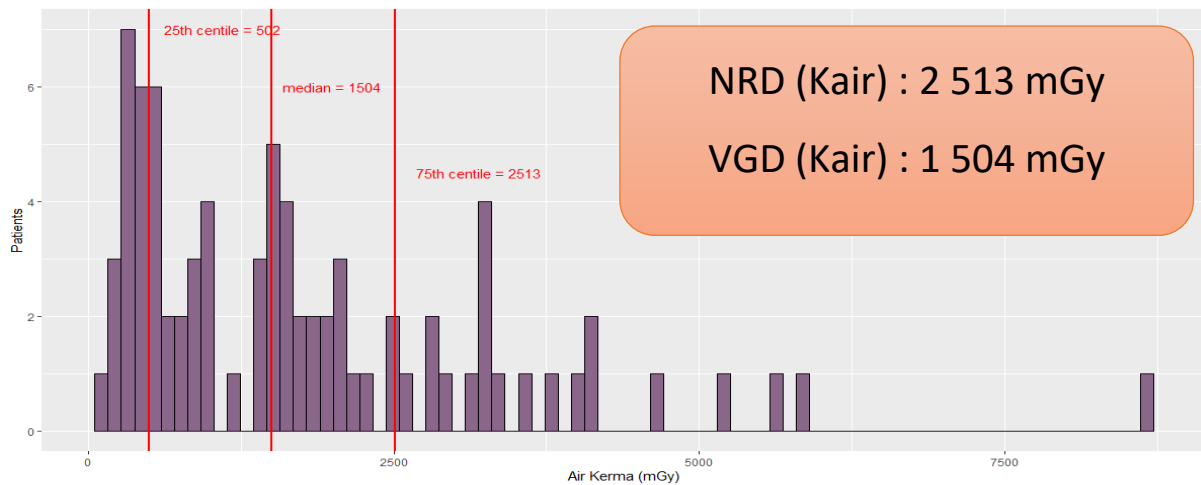


Figure 22 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « saignement d'origine rétro-péritonéale » (n = 80 procédures)

B. Discussion

Ces procédures sont plus ou moins complexes selon l'indication qui est le plus souvent un hématome du muscle ilio-psoas. Les cibles à traiter peuvent être difficiles à atteindre, et la présence d'une extravasation peut manquer (saignements intermittents), rallongeant potentiellement la procédure et donc le temps de scopie. En outre, l'analyse visuelle montrait un étalement assez vaste des doses absorbées, donc des procédures non standardisées. En effet, cette distribution hétérogène pouvait être expliquée par la variabilité du nombre d'artères, les répétitions parfois accrues de sérigraphies pour démasquer le saignement qui n'était pas toujours visible sur le scanner préopératoire ou encore les morphotypes parfois très différents des patients.

De plus, le volume irradié est conséquent, intéressant l'ensemble de la cavité abdomino-pelvienne si toutes les artères potentiellement incriminées sont cathétérisées. Aucune série spécifique à ce sous-groupe n'a pu être retrouvée dans la littérature. Les mesures de radioprotection sont d'autant plus nécessaires dans ce type d'intervention du fait de doses absorbées relativement élevées en comparaison avec les autres procédures endovasculaires se déroulant au sein de la cavité abdomino-pelvienne.

VIII. Saignement d'origine splénique

Ce sous-groupe contenait n = 127 procédures.

A. Résultats

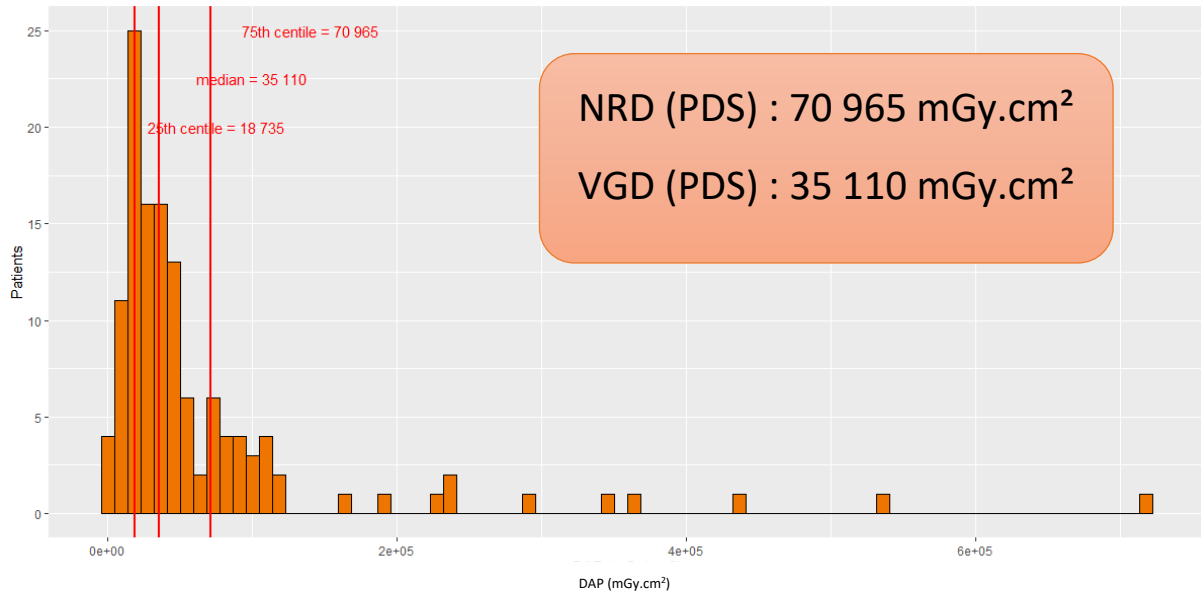


Figure 23 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « saignement d'origine splénique »

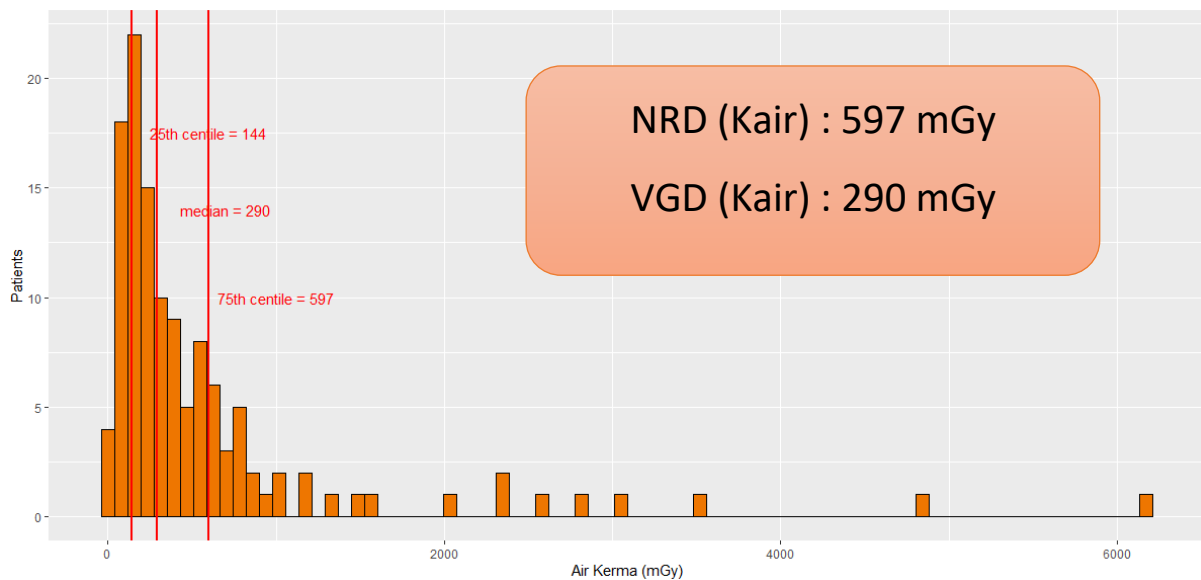


Figure 24 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « saignement d'origine splénique » (n = 124 procédures)

B. Discussion

Ce sous-groupe contenait des étiologies différentes de saignement en provenance de l'artère splénique, mais les traumatismes de la rate sont les causes les plus fréquentes. En général, seule l'artère splénique et/ou ses branches sont traitées, expliquant ainsi une distribution assez groupée des doses, témoignant d'une procédure standardisée, à l'inverse des hématomes rétropéritonéaux. En comparant le PDS et le Kair au 75^{ème} percentile par rapport au sous-groupe « visceral artery embolization » d'Heilmaier et al, on a constaté que les 75^{èmes} percentiles de notre cohorte se situait en-dessous, indiquant une sensibilisation de notre équipe aux mesures de radioprotection (74).

IX. Traumatisme du bassin

Ce sous-groupe contenait n = 70 procédures.

A. Résultats

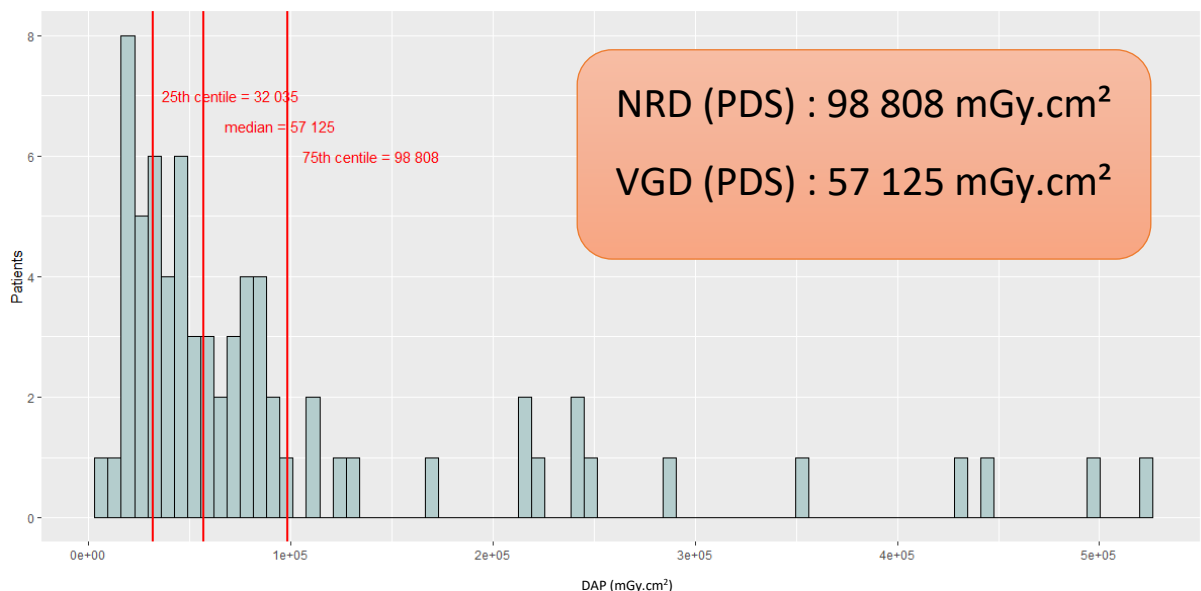


Figure 25 : Répartition du PDS dans le sous-groupe « traumatisme du bassin »

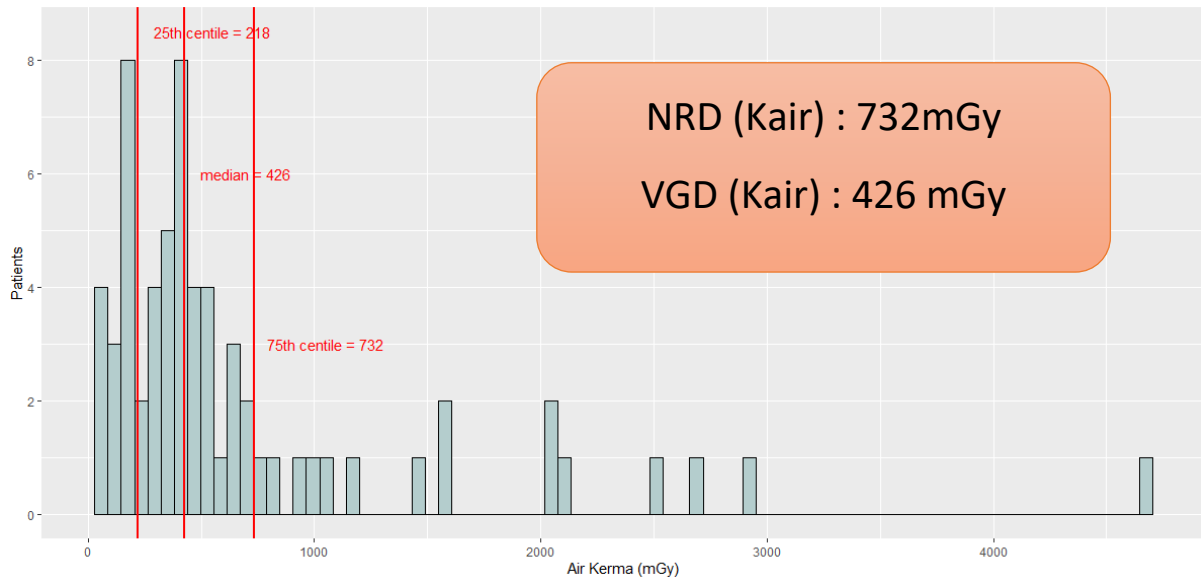


Figure 26 : Répartition du Kair dans le sous-groupe « traumatisme du bassin » (n = 64 procédures)

B. Discussion

Ces procédures se déroulent le plus souvent dans un contexte de polytraumatisme avec choc hémorragique et la présence d'autres lésions associées graves, et doivent donc être rapides. Seuls les patients n'ayant bénéficié que d'une embolisation pour traumatisme du bassin ont été inclus dans ce sous-groupe. Ces embolisations pour la grande majorité proximales et temporaires expliquent des 75^{èmes} percentiles du PDS et du Kair relativement bas pour des artères situées au sein de la cavité pelvienne. Le sous-groupe « pelvic vessel embolization » de la série d'Heilmaier et al portant sur 11 et 12 patients pour les procédures dites standards et difficiles respectivement, affichait un 75^{ème} percentile du PDS à 147,2 Gy.cm² et à 200,3 Gy.cm², et un 75^{ème} percentile du Kair à 1,22 Gy et à 1,3Gy (74). A noter que cette cohorte regroupait également les embolisations en lien avec des saignements d'origine veineuse, ce qui ne figure pas dans notre cohorte.

Le sous-groupe de la série de Miller et al intitulé « pelvic artery embolization for trauma or tumor » portant sur 35 procédures, présentait un PDS et un Kair au 75^{ème} percentile à 353,9 Gy.cm² et 1,879 Gy (73).

Les 75^{èmes} percentiles de notre sous-groupe se situait en-dessous de ces séries publiées, indiquant également une sensibilisation de notre équipe aux mesures de radioprotection.

X. Saignement d'origine génitale

Ce sous-groupe contenait n = 69 procédures.

A. Résultats

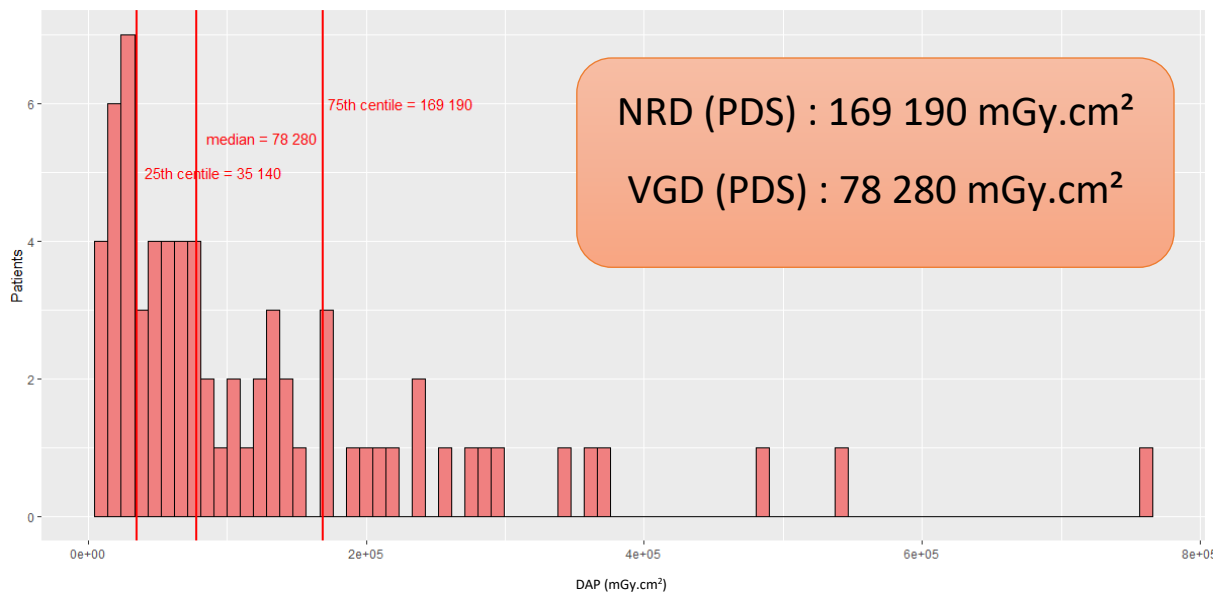


Figure 27 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « saignement d'origine génitale »

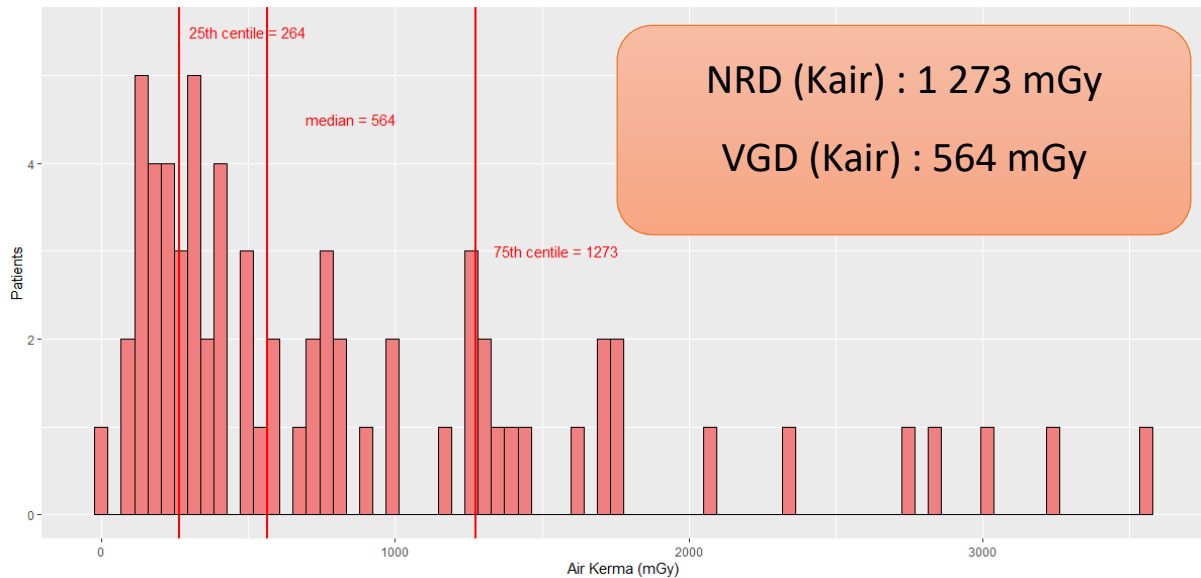


Figure 28 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « saignement d'origine génitale » (n = 68 procédures)

B. Discussion

Le sous-groupe « saignement d'origine génitale » contient principalement les hémorragies de la délivrance. Ces procédures doivent également être rapides car le pronostic vital peut être engagé chez des femmes jeunes. Par conséquent, de la même manière que dans les traumatismes du bassin, le PDS et le Kair au 75^{ème} percentile sont bas.

Le PDS au 75^{ème} percentile de notre sous-groupe se situait dans le même ordre que la VGD publiée en 2019 (170 Gy.cm²) et donc bien en-dessous du NRD, indiquant également une sensibilisation de notre équipe aux mesures de radioprotection.

La série de Etard et al portant sur 142 procédures dans son sous-groupe « uterine artery embolization (postpartum haemorrhage) » présentait un PDS et un Kair au 75^{ème} percentile à 251,1 Gy.cm² et à 0,927 Gy respectivement (69).

Le PDS au 75^{ème} percentile de notre sous-groupe était en-dessous du niveau constaté dans cette étude, mais le Kair au 75^{ème} percentile apparait légèrement plus élevé, pouvant être expliqué par une meilleure utilisation par notre équipe de la collimation, mais également potentiellement d'une utilisation moins optimale d'autres paramètres augmentant la dose d'entrée par rapport à l'autre équipe (nombre d'images de graphie plus élevé, incidences obliques plus importantes, temps de scopie plus long...).

XI. Saignement en provenance de la paroi abdominale antérieure

Ce sous-groupe contenait n = 73 procédures.

A. Résultats

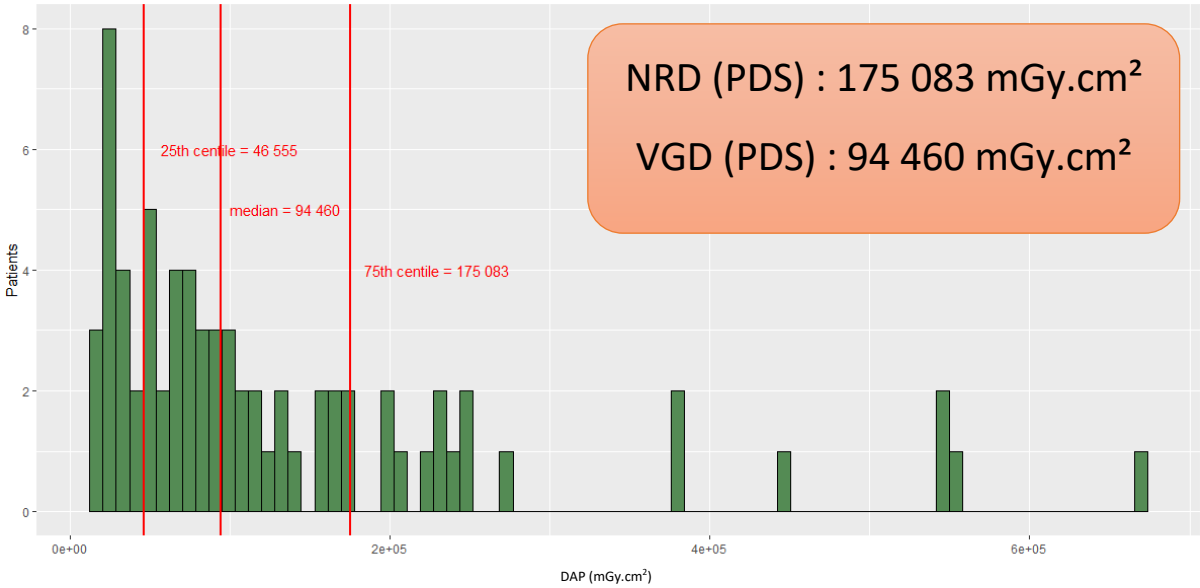


Figure 29 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « saignement en provenance de la paroi abdominale antérieure » (n = 72 procédures)

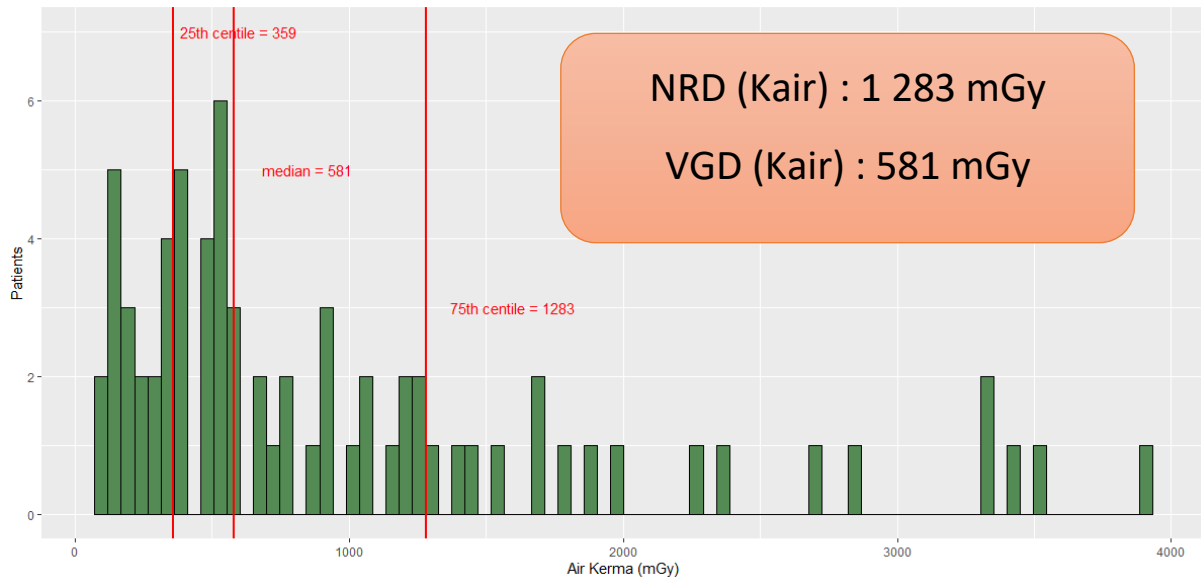


Figure 30 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « saignement en provenance de la paroi abdominale antérieure » (n = 71 procédures)

B. Discussion

Ces procédures sont en général rapides étant donné l'accessibilité facile des artères cibles et la présence en général d'un seul vaisseau à traiter. Aucune donnée spécifique à ce sous-groupe concernant une étude de la dose absorbée n'a pu être retrouvée dans la littérature.

XII. Pose de filtre cave

Ce sous-groupe contenait n = 257 procédures.

A. Résultats

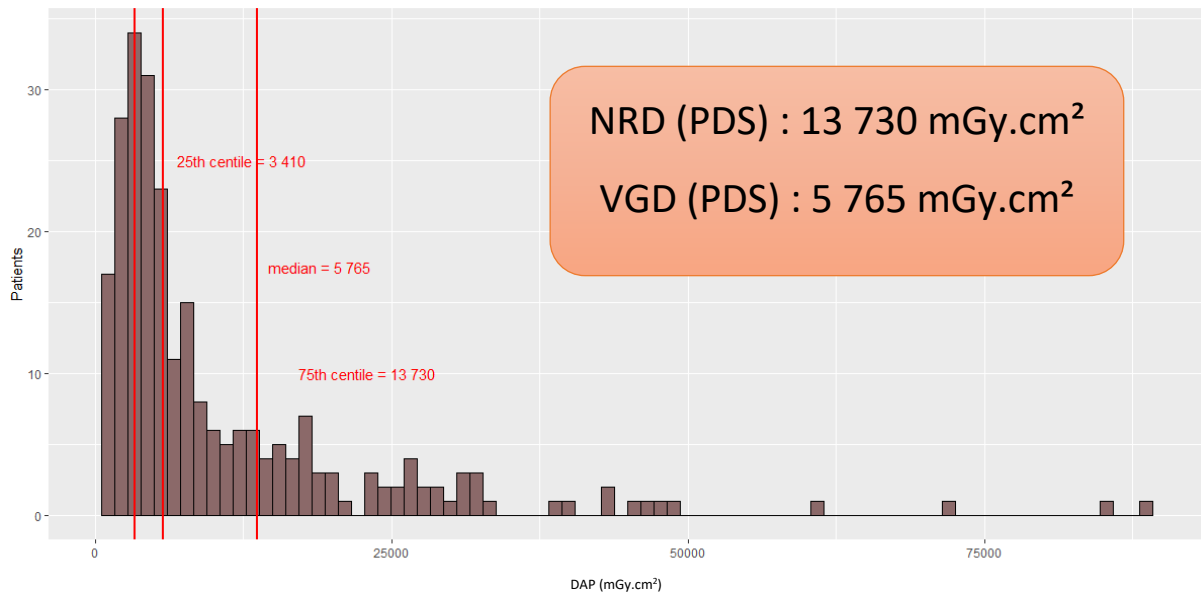


Figure 31 : Distribution du PDS dans le sous-groupe « pose de filtre cave » (n = 252 procédures)

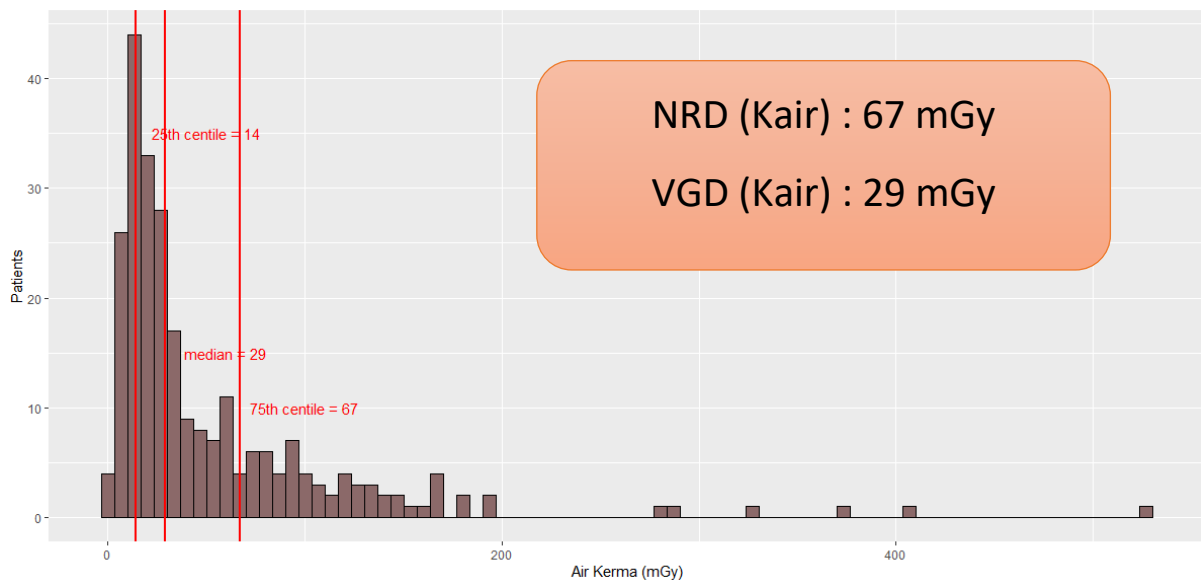


Figure 32 : Distribution du Kair dans le sous-groupe « pose de filtre cave » (n = 253 procédures)

B. Discussion

Cette procédure est en règle générale très rapide, avec un temps de scopie de moins de cinq minutes.

Dans la littérature, peu de séries comparatives sont disponibles. Le sous-groupe « inferior vena cava filter placement » de la série de Miller et al comportant 274 patients présentait un PDS et un Kair au 75^{ème} percentile à 39,83 Gy.cm² et à 0,146 Gy (73). Les chiffres de notre cohorte apparaissaient en-dessous de cette étude.

XIII. Analyse sur toute la population

A. Analyse bi-variée

Tableau 6 : Analyse bi-variée selon le PDS dans l'échantillon complet

Caractéristiques	Echantillon N = 1,422 ¹	PDS ≤ 75th centile N = 1,065 ¹	PDS > 75th centile N = 357 ¹	p- value ²
Indication				>0.9
Pelvis	70 (4.9%)	52 (4.9%)	18 (5.0%)	
Hémorragie digestive haute	175 (12%)	130 (12%)	45 (13%)	
Pose de filtre cave	252 (18%)	189 (18%)	63 (18%)	
Saignement hépato-biliaire	78 (5.5%)	58 (5.4%)	20 (5.6%)	
Saignement d'origine génitale	69 (4.9%)	52 (4.9%)	17 (4.8%)	
Paroi abdominale antérieure	72 (5.1%)	54 (5.1%)	18 (5.0%)	
Hémorragie digestive basse	53 (3.7%)	40 (3.8%)	13 (3.6%)	
Hémoptysie	385 (27%)	289 (27%)	96 (27%)	
Saignement d'origine splénique	127 (8.9%)	95 (8.9%)	32 (9.0%)	
Saignement d'origine rénale	61 (4.3%)	46 (4.3%)	15 (4.2%)	
Rétropéritoine	80 (5.6%)	60 (5.6%)	20 (5.6%)	

Temps d'intervention				0.7
Jour	758 (53%)	564 (53%)	194 (54%)	
Nuit	664 (47%)	501 (47%)	163 (46%)	
Genre				0.001
F	523 (37%)	417 (39%)	106 (30%)	
M	899 (63%)	648 (61%)	251 (70%)	
Age (années)	62 (47, 71)	60 (45, 71)	64 (53, 72)	<0.001
IMC (kg/m²)	25.0 (21.7, 28.8)	24.4 (21.2, 27.8)	27.8 (24.1, 32.0)	<0.001
Données manquantes	400	305	95	
Opérateurs				<0.001
C	222 (16%)	174 (16%)	48 (13%)	
J	108 (7.6%)	85 (8.0%)	23 (6.4%)	
M	131 (9.2%)	72 (6.8%)	59 (17%)	
P	110 (7.7%)	77 (7.2%)	33 (9.2%)	
U	145 (10%)	125 (12%)	20 (5.6%)	
W	154 (11%)	109 (10%)	45 (13%)	
Autres	552 (39%)	423 (40%)	129 (36%)	
Temps de scopie (minutes)	21 (11, 33)	19 (10, 29)	31 (18, 46)	<0.001
Données manquantes	130	83	47	
Images de graphie	82 (40, 139)	73 (38, 119)	115 (61, 180)	<0.001
Utilisation de la 3D	41 (2.9%)	27 (2.5%)	14 (3.9%)	0.2
Incidence de face	1,393 (98%)	1,043 (98%)	350 (98%)	>0.9
Incidence oblique	394 (28%)	268 (25%)	126 (35%)	<0.001
Incidence de profil	42 (3.0%)	27 (2.5%)	15 (4.2%)	0.11
Collimation	992 (70%)	796 (75%)	196 (55%)	<0.001
Zoom	768 (54%)	558 (52%)	210 (59%)	0.035
¹ n (%) ; Médiane (IQR)				
2 Test du Chi ² de Pearson; test de la somme des rangs de Wilcoxon; test exact de Fisher				

B. Analyse multivariée (régression logistique)

Variable	N	Odds ratio	Reference	p
Gender			Reference	
	F 327			
	M 608		1.71 (1.16, 2.56)	0.008
Age	935		1.01 (1.00, 1.02)	0.042
BMI	935		1.16 (1.13, 1.20)	<0.001
Provider			Reference	
	C 158			
	J 72		1.36 (0.61, 2.95)	0.441
	M 64		2.04 (0.92, 4.53)	0.078
	Other 388		1.11 (0.65, 1.95)	0.704
	P 70		3.41 (1.61, 7.22)	0.001
	U 88		0.71 (0.30, 1.58)	0.411
	W 95		1.30 (0.63, 2.70)	0.477
Scopy_duration	935		1.04 (1.03, 1.05)	<0.001
Number_of_graphs	935		1.01 (1.00, 1.01)	<0.001
Use_of_3D	935		1.15 (0.36, 3.31)	0.808
Oblique_incidence	935		0.91 (0.58, 1.40)	0.664
Side_incidence	935		1.81 (0.63, 4.86)	0.253
Collimation			Reference	
	No 281			
	Yes 654		0.26 (0.17, 0.40)	<0.001
Zoom			Reference	
	No 439			
	Yes 496		0.73 (0.49, 1.09)	0.121

Figure 33 : Analyse en régression logistique sur l'échantillon complet

L'échantillon analysé comprenait 1422 procédures.

Avant ajustement, les variables associées à un dépassement du 75^{ème} percentile étaient :

- Un âge élevé ($p < 0,001$).
- Le sexe masculin ($p = 0,001$).
- Un IMC élevé ($p < 0,001$).
- Un allongement du temps de scopie ($p < 0,001$).
- Un nombre élevé d'images de graphies ($p < 0,001$).
- L'utilisation d'une incidence oblique ($p < 0,001$).
- L'utilisation de la collimation est en revanche un facteur protecteur de dépassement du 75^{ème} percentile ($p < 0,001$).

Après ajustement (Figure 33), on a observé que les hommes avaient un risque plus élevé de dépassement du 75^{ème} percentile ($p = 0,008$), quelle que soit l'intervention considérée.

Un âge ($p = 0,042$) ou un IMC élevé ($p < 0,001$), un nombre important de graphies ($p < 0,001$), ou une augmentation de la durée de scopie ($p < 0,001$), étaient également des facteurs de risque, bien que l'Odd Ratio (OR) fût moins important.

Un opérateur (P) était associé à une augmentation significative du risque de dépassement, en prenant pour référence l'opérateur C qui était celui qui avait réalisé le plus de gestes ($p = 0,001$).

Le type d'incidence, de même que l'utilisation d'une acquisition volumique ou la réalisation d'un zoom n'étaient pas significativement associés à une modification du risque, après ajustement sur les autres facteurs, dans l'échantillon complet.

En revanche, l'utilisation d'une collimation était associée à une réduction significative du risque de dépassement du 75^{ème} percentile du PDS ($p < 0,001$).

C. Discussion

Cette analyse retrouvait les facteurs de risque classiques d'augmentation de la dose absorbée : IMC élevé, temps de scopie allongé, nombre important d'images de graphie, utilisation d'une incidence oblique. L'âge du patient et le sexe masculin ont également été identifiés comme facteurs de risque de dépassement du 75^{ème} percentile comme lors de l'analyse multivariée du sous-groupe « hémoptysie » : les facteurs de risque d'athérosclérose seraient-ils responsables indirectement d'une augmentation de la dose absorbée en compliquant la procédure endovasculaire ? Aucune donnée dans la littérature ne confirme cette hypothèse. Des études supplémentaires sont nécessaires en analysant notamment le temps de scopie chez

ces patients par rapport aux autres. On rappelle toutefois que lorsque les NRD sont dépassés, le temps de scopie est alors pris en compte, signifiant l'importance de ce dernier en radioprotection.

La force de cette analyse résidait dans l'échantillon important de patients, les diversités des procédures et le nombre élevé de variables considérées.

La limite principale concernait les données manquantes lors du recueil, notamment l'IMC (n = 400, soit 28,1% de l'effectif). Le nombre important de données manquantes pourrait induire un manque de précision dans l'estimation du risque de dépassement du 75^{ème} percentile induit par une augmentation de l'IMC.

XIV. Discussion générale

A. Résultats de l'étude en comparaison avec la littérature

Dans les différentes discussions rapportées par indication, il a été comparé les NRD locaux avec des NRD officiels et avec les données publiées d'autres centres.

Globalement, les résultats de notre centre se situaient en deçà ou étaient dans le même ordre de valeurs que les séries publiées indiquant une sensibilisation de notre équipe aux mesures de radioprotection. La méthodologie de recueil rétrospective utilisée a permis de réduire les biais, car les opérateurs n'avaient pas conscience, au moment de la réalisation des gestes, qu'un recueil serait réalisé. Il faut cependant garder à l'esprit que selon les centres, les procédures ne sont pas forcément les mêmes en termes de variabilités techniques d'embolisation, et que le degré d'indication à un traitement endovasculaire peut différer selon les présentations radio-cliniques, l'expérience et les habitudes locales.

Encore une fois, l'analyse du temps de scopie, qui prend une place importante dans l'établissement de NRD doit être poursuivie dans des études futures afin de permettre une meilleure comparaison avec les données de la littérature. Le but de ce travail était dans un premier temps de recueillir les paramètres de doses absorbées afin d'établir des NRD locaux. L'analyse de la distribution du temps de scopie se fait en cas de dépassement du NRD du PDS, ce qui n'avait pas été le cas dans notre équipe.

La force principale de cette étude résidait dans son effectif important, ayant permis une analyse détaillée du sous-groupe « hémoptysie ».

En Europe, d'autres NRD existent ou sont en cours d'élaboration (Figure 34), soulignant ainsi l'importance depuis l'avènement de la radiologie interventionnelle de limiter autant que possible l'exposition aux rayonnements ionisants, afin de conserver une balance bénéfice risque favorable, répondant aux principes ALARA.

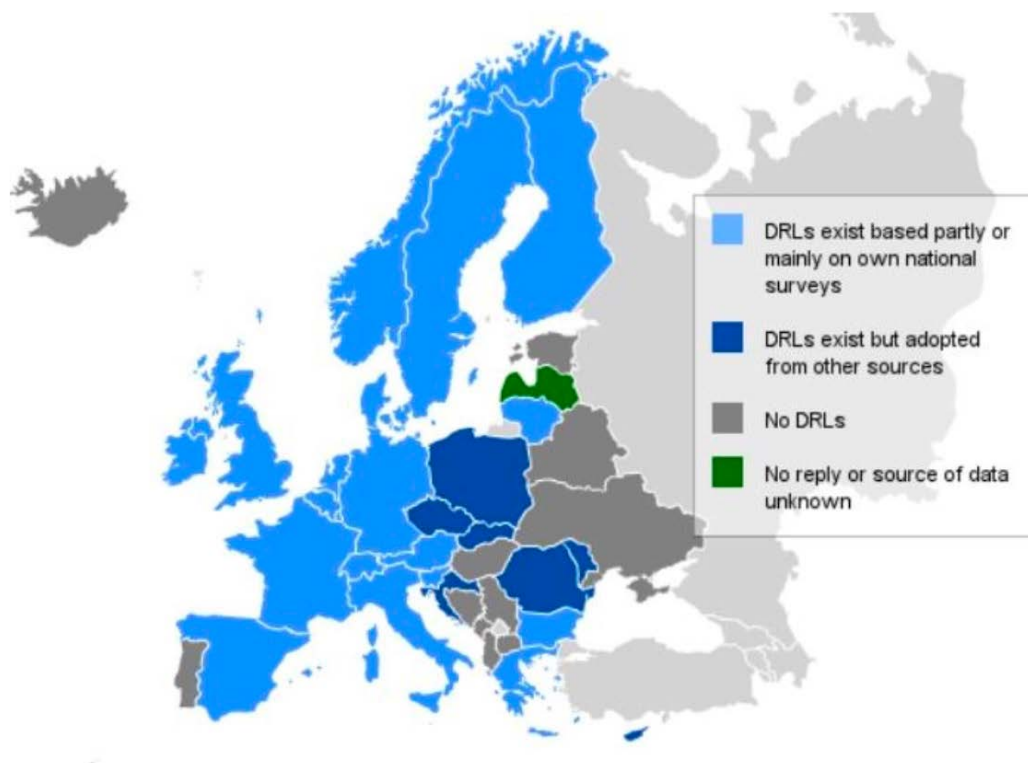


Figure 34 : Pays européens disposant de NRD en 2014 (75)

B. Limites de l'étude

La première limite de cette étude était liée au caractère rétrospectif du recueil, impliquant un manque de données non négligeable notamment concernant l'IMC, ne figurant pas toujours dans le dossier médical ou sur les examens d'imagerie, mais aussi du fait d'un recueil réalisé à l'aide de plusieurs systèmes afin d'en collecter le plus possible (PACS, système d'information, registres des manipulateurs de la salle hybride) impliquant une dispersion des données.

La mise à disposition d'un DACS et notamment de la solution DoseWatch® (General Electric Healthcare Systems, Buc, France) dans la salle hybride des urgences permet un recueil exhaustif des données relatives à la radioprotection, sous réserve d'un renseignement complet et systématique des données par l'équipe, quelle que soit l'heure et malgré le contexte d'urgence. Cela a permis un recueil plus rapide et plus précis.

La deuxième limite concernait le regroupement de procédures au sein d'une même indication : ainsi, dans le sous-groupe « hémoptysie », ont été regroupées l'embolisation des artères bronchiques et l'embolisation des artères pulmonaires ; dans le sous-groupe « hémorragie d'origine génitale », on a regroupé le traitement des hémorragies de la délivrance mais aussi les autres indications d'hémostase en urgence du pelvis féminin. Les derniers NRD promulgués l'ont été d'après des indications ou des procédures précises, sans notion de région anatomique. Afin d'obtenir des effectifs suffisants, les regroupements ont été effectués entre des gestes techniquement homogènes (cathétérisme, nature du vaisseau cible, agent d'embolisation, critères d'arrêt du geste).

Enfin, du fait de trop faibles effectifs, les sous-groupes « pédiatrie », « polytraumatisme », « membres » n'ont pas fait l'objet d'analyse statistique. En effet, il est recommandé d'établir des NRL pour des effectifs de plus de trente procédures (68). Les patients ayant subi une procédure dite inclassable car résultant d'une indication exceptionnelle dans la salle hybride ont également été recueillis mais non analysés (pose de cathéter veineux centraux à insertion périphérique (PICC line)), stent cave supérieur, retrait de corps étranger).

La troisième limite était l'analyse non exhaustive et parfois incomplète des paramètres influant la dose absorbée. En effet, à travers un recueil rétrospectif manuel, il était impossible d'évaluer le mode et l'intensité de la scopie (pulsée vs continue, scopie normale (par défaut) vs scopie basse) ; la cadence image ; l'intensité du zoom (x 2, x 4 ou x 8) ; l'ampleur de la collimation ; la distance du capteur par rapport au patient, qui sont des paramètres essentiels influant la dose absorbée. Encore une fois, un logiciel de gestion des doses pourrait permettre une analyse précise de ces paramètres dans de futures études. En effet, DoseWatch® (General Electric Healthcare Systems, Buc, France) permet de recueillir certains de ces paramètres et donc combler les lacunes d'un recueil manuel. Néanmoins, si le système de DACS semble être un outil précieux pour le suivi dosimétrique et l'évaluation des pratiques au sein d'un centre, on devra garder en mémoire l'importance fondamentale de la qualité des données renseignées qui nécessitent toujours, au moins en partie, l'intervention humaine.

Enfin, cette étude analysait seulement la dose absorbée via les distributions du PDS et du Kair, et n'évaluait donc pas les doses efficace ou équivalente, qui sont les meilleures estimations des risques biologiques liés à l'exposition aux rayonnements ionisants.

On peut citer la revue de la littérature réalisée par Miller en 2019 qui récapitulait les doses efficaces et équivalentes des procédures les plus courantes en radiologie interventionnelle, en prenant des facteurs de pondération tissulaire composites publiés dans la littérature pour chaque indication (76). L'analyse de la dose absorbée conserve l'avantage d'un recueil simple et une analyse rapide des procédures de radiologie interventionnelle en termes de radioprotection.

C. Importance des connaissances de l'opérateur en radioprotection

L'opérateur doit être sensibilisé à l'exposition des patients aux rayonnements ionisants étant donné les risques bien connus qu'ils représentent. En urgence, le contexte souvent critique des patients peut faire négliger les mesures de radioprotection mais connaître les paramètres modifiables sur la table d'angiographie (collimation, zoom, type de scopie, images de graphie) permet de ne pas perdre plus de temps, d'autant plus que sur l'astreinte, les gestes se font avec un sénior et un interne.

L'étude a de plus montré que le moment du geste (Jour/Nuit) n'a pas d'incidence significative sur la dose absorbée, soulignant la rigueur de l'équipe à respecter les mesures de radioprotection quelle que soit l'heure du geste. En effet, cette variable a été analysée de manière qualitative binaire en « Jour » (8h30-18h30) et « Nuit » (18h30-8h30) en raison du changement d'opérateur.

L'enjeu de cette étude était de rappeler l'importance des mesures de radioprotection en urgence.

CONCLUSION

Cette étude a permis la réalisation d'un recueil rétrospectif d'un grand nombre de patients, sur une période de cinq ans au sein de la salle d'angiographie des urgences du CHU de Lille.

La comparaison avec les NRD publiés en 2019 et avec les données de la littérature montre que l'équipe de radiologie interventionnelle d'hémostase d'urgence a globalement rendu systématique les mesures de radioprotection et par extension les principes ALARA, y compris dans le contexte de l'urgence.

La plupart des facteurs de risque de dépassement des NRD locaux sont globalement les mêmes que ceux retrouvés dans la littérature. Néanmoins, la durée de scopie n'a pas été exploitée comme variable explicative. Par ailleurs, l'âge et le sexe masculin apparaissent également dans notre série comme des facteurs de risque, ce qui n'avait pas été rapporté (l'athérome étant un facteur confondant potentiel).

Ce recueil de données intégralement réalisé manuellement met en exergue la facilité d'accès aux données, permise par les systèmes de type DACS.

BIBLIOGRAPHIE

1. Arnold MJ, Keung JJ, McCarragher B. Interventional Radiology: Indications and Best Practices. *Interv Radiol.* 2019;99(9):10.
2. Department of Neurological Surgery, University of Washington school of medicine. *The Montlake Cut.* juill 2009;1(3):5.
3. Baum RA, Baum S. Interventional Radiology: A Half Century of Innovation. *Radiology.* nov 2014;273(2S):S75-91.
4. Hu J, Albadawi H, Chong BW, Deipolyi AR, Sheth RA, Khademhosseini A, et al. Advances in Biomaterials and Technologies for Vascular Embolization. *Adv Mater.* août 2019;31(33):1901071.
5. Friedman SG. Charles Dotter: Interventional Radiologist. 1989;172(3):4.
6. *Radioactif Magazine.* JFR 2018. Oct 2018 ; No 33.
7. Rosch J. Selective Arterial Embolization. 1972;4.
8. Rémy J, Arnaud A, Fardou H, Giraud R, Voisin C. Treatment of Hemoptysis by Embolization of Bronchial Arteries. *Radiology.* janv 1977;122(1):33-7.
9. Rösch J, Hanafee WN, Snow H. Transjugular Portal Venography and Radiologic Portacaval Shunt: An Experimental Study. *Radiology.* avr 1969;92(5):1112-4.
10. Liu J-L, Li J-Y, Jiang P, Jia W, Tian X, Cheng Z-Y, et al. Literature review of peripheral vascular trauma: Is the era of intervention coming? *Chin J Traumatol.* févr 2020;23(1):5-9.
11. Matsumoto J, Lohman BD, Morimoto K, Ichinose Y, Hattori T, Taira Y. Damage control interventional radiology (DCIR) in prompt and rapid endovascular strategies in trauma occasions (PRESTO): A new paradigm. *Diagn Interv Imaging.* juill 2015;96(7-8):687-91.
12. Rossaint R, Bouillon B, Cerny V, Coats TJ, Duranteau J, Fernández-Mondéjar E, et al. The European guideline on management of major bleeding and coagulopathy following trauma: fourth edition. *Crit Care.* déc 2016;20(1):100.
13. Gralnek IM, Neeman Z, Strate LL. Acute Lower Gastrointestinal Bleeding. Solomon CG, éditeur. *N Engl J Med.* 16 mars 2017;376(11):1054-63.
14. Pech M, Serafin Z, Fischbach F, Damm R, Jargiello T, Seidensticker M, et al. Transarterial embolization of acute iatrogenic hemorrhages: predictive factors for

mortality and outcome. *Br J Radiol.* juin 2020;93(1110):20190413.

15. Chabrot P, Boyer L. *Embolisation.* Springer. 2012.
16. Europharmat. *Ateliers stents périphériques vasculaire.* Octobre 2013.
17. Earwood JS. Hemoptysis: Evaluation and Management. 2015;91(4):7.
18. Dead space. *Interactive Respiratory Physiology.* Johns Hopkins School of Medicine's. [Internet] Consulté le 15 août 2021. Disponible sur : https://oac.med.jhmi.edu/res_phys/Encyclopedia/DeadSpace/DeadSpace.HTML
19. Khalil A, Fedida B, Parrot A, Haddad S, Fartoukh M, Carette M-F. Severe hemoptysis: From diagnosis to embolization. *Diagn Interv Imaging.* juill 2015;96(7-8):775-88.
20. Thony F, Rodière M, Frandon J, Vendrell A, Jankowski A, Ghelfi J, et al. Polytraumatism and solid organ bleeding syndrome: The role of imaging. *Diagn Interv Imaging.* juill 2015;96(7-8):707-15.
21. Sahani D, Mehta A, Blake M, Prasad S, Harris G, Saini S. Preoperative Hepatic Vascular Evaluation with CT and MR Angiography: Implications for Surgery. *RadioGraphics.* sept 2004;24(5):1367-80.
22. Monnin V, Sengel C, Thony F, Bricault I, Voirin D, Letoublon C, et al. Place of Arterial Embolization in Severe Blunt Hepatic Trauma: A Multidisciplinary Approach. *Cardiovasc Intervent Radiol.* sept 2008;31(5):875-82.
23. Loffroy R, Guiu B. Role of transcatheter arterial embolization for massive bleeding from gastroduodenal ulcers. *World J Gastroenterol.* 2009;15(47):5889.
24. Karuppasamy K, Kapoor BS, Fidelman N, Abujudeh H, Bartel TB, Caplin DM, et al. ACR Appropriateness Criteria® Radiologic Management of Lower Gastrointestinal Tract Bleeding: 2021 Update. *J Am Coll Radiol.* mai 2021;18(5):S139-52.
25. Ząbkowski et al. Analysis of Renal Trauma in Adult Patients: A 6-Year Own Experiences of Trauma Center. *Urology Journal.* July-August 2015. Vol 12 No 04.
26. Muller A, Rouvière O. Renal artery embolization—indications, technical approaches and outcomes. *Nat Rev Nephrol.* mai 2015;11(5):288-301.
27. Sunga KL, Bellolio MF, Gilmore RM, Cabrera D. Spontaneous Retroperitoneal Hematoma: Etiology, Characteristics, Management, and Outcome. *J Emerg Med.* août 2012;43(2):e157-61.
28. Chan YC, Morales JP, Reidy JF, Taylor PR. Management of spontaneous and iatrogenic retroperitoneal haemorrhage: conservative management, endovascular intervention or open surgery? Management of retroperitoneal haemorrhage. *Int J Clin Pract.* 19 oct 2007;62(10):1604-13.
29. Zarzaur BL, Rozycki GS. An update on nonoperative management of the spleen

in adults. *Trauma Surg Acute Care Open*. juin 2017;2(1):e000075.

30. Coccolini F, Montori G, Catena F, Kluger Y, Biffl W, Moore EE, et al. Splenic trauma: WSES classification and guidelines for adult and pediatric patients. *World J Emerg Surg*. déc 2017;12(1):40.

31. Arvieux C, Frandon J, Tidadini F, Monnin-Bares V, Foote A, Dubuisson V, et al. Effect of Prophylactic Embolization on Patients With Blunt Trauma at High Risk of Splenectomy: A Randomized Clinical Trial. *JAMA Surg*. 1 déc 2020;155(12):1102.

32. Frandon J, Rodière M, Arvieux C, Michoud M, Vendrell A, Broux C, et al. Blunt splenic injury: Outcomes of proximal versus distal and combined splenic artery embolization. *Diagn Interv Imaging*. sept 2014;95(9):825-31.

33. Demetriades D, Karaiskakis M, Toutouzas K, Alo K, Velmahos G, Chan L. Pelvic Fractures: Epidemiology and Predictors of Associated Abdominal Injuries and Outcomes. *J Am Coll Surg*. 2002;195(1):10.

34. Yoon W, Kim JK, Jeong YY, Seo JJ, Park JG, Kang HK. Pelvic Arterial Hemorrhage in Patients with Pelvic Fractures: Detection with Contrast-enhanced CT. *RadioGraphics*. nov 2004;24(6):1591-605.

35. Wong Y-C, Wang L-J, Ng C-J, Tseng I-C, See L-C. Mortality after Successful Transcatheter Arterial Embolization in Patients with Unstable Pelvic Fractures: Rate of Blood Transfusion as a Predictive Factor. *J Trauma Inj Infect Crit Care*. juill 2000;49(1):71-5.

36. Benson G. Primary post-partum haemorrhage – Causation and management. *J Perioper Pract*. avr 2019;29(4):75-80.

37. Drife J. Management of primary postpartum haemorrhage. *BJOG Int J Obstet Gynaecol*. mars 1997;104(3):275-7.

38. Gaia G, Chabrot P, Cassagnes L, Calcagno A, Gallot D, Botchorishvili R, et al. Menses recovery and fertility after artery embolization for PPH: a single-center retrospective observational study. *Eur Radiol*. févr 2009;19(2):481-7.

39. Soro M-AP, Denys A, de Rham M, Baud D. Short & long term adverse outcomes after arterial embolisation for the treatment of postpartum haemorrhage: a systematic review. *Eur Radiol*. févr 2017;27(2):749-62.

40. Ruiz Labarta FJ, Pintado Recarte MP, Alvarez Luque A, Joigneau Prieto L, Perez Martín L, Gonzalez Leyte M, et al. Outcomes of pelvic arterial embolization in the management of postpartum haemorrhage: a case series study and systematic review. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol*. nov 2016;206:12-21.

41. Carrafiello G, Laganà D, Mangini M, Fontana F, Chiara R, Filippo P, et al. Percutaneous Treatment of Traumatic Upper-extremity Arterial Injuries: A Single-center Experience. *J Vasc Interv Radiol*. janv 2011;22(1):34-9.

42. Mavili E, Donmez H, Ozcan N, Akcali Y. Endovascular Treatment of Lower Limb Penetrating Arterial Traumas. *Cardiovasc Intervent Radiol*. 2 nov 2007;30(6):1124-9.

43. Division of Interventional Radiology, Department of Radiology, Hematology and Oncology, São Paulo University Ribeirão Preto School of Medicine, São Paulo, Brazil, Albuquerque TVC, Monsignore LM, Division of Interventional Radiology, Department of Radiology, Hematology and Oncology, São Paulo University Ribeirão Preto School of Medicine, São Paulo, Brazil, de Castro-Afonso LH, Division of Interventional Radiology, Department of Radiology, Hematology and Oncology, São Paulo University Ribeirão Preto School of Medicine, São Paulo, Brazil, et al. Transarterial embolization with n-butyl cyanoacrylate for the treatment of abdominal wall hemorrhage. *Diagn Interv Radiol.* 12 mai 2020;26(3):216-22.
44. Duffett L, Carrier M. Inferior vena cava filters. *J Thromb Haemost.* janv 2017;15(1):3-12.
45. Spencer FA, Bates SM, Goldberg RJ, Lessard D, Emery C, Glushchenko A, et al. A Population-Based Study of Inferior Vena Cava Filters in Patients With Acute Venous Thromboembolism. *Arch Intern Med [Internet].* 13 sept 2010 ;170(16). Consulté le 10 juillet 2021. Disponible sur : <http://archinte.jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/archinternmed.2010.272>
46. Esposito D, Gonfiantini F, Fargion AT, Dorigo W, Villani F, Di Domenico R, et al. Hybrid operating room applications in the increasingly complex endovascular era: the trump card of modern vascular surgery. *Ann Surg Treat Res.* 2021;100(1):54.
47. Interactions rayonnement-matière [Internet]. Consulté le 19 août 2021. Disponible sur : http://www.nucleide.org/Gamma_spectro/interactions.htm. Avec l'aimable autorisation de Mr. Christophe Dulieu
48. Chapitre 48 - Les rayonnements ionisants [Internet]. Consulté le 1^{er} septembre 2021. Disponible sur : <http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo048.htm>
49. Les concepts de dose [Internet]. Consulté le 19 août 2021. Disponible sur : https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Nucleaire_et_societe/education-radioprotection/bases_radioactivite/Pages/9-concepts-de-dose.aspx#.YR66r4gzaUI
50. Bolus NE. Basic Review of Radiation Biology and Terminology. *J Nucl Med Technol.* déc 2017;45(4):259-64.
51. Laurier D. Fondamentaux du système de radioprotection : notion de risque lié aux rayonnements ionisants. 2014 nov 19; Paris.
52. Ulanowski A, Kaiser JC, Schneider U, Walsh L. Lifetime radiation risk of stochastic effects – prospective evaluation for space flight or medicine. *Ann ICRP.* déc 2020;49(1_suppl):200-12.
53. Les conséquences des rayonnements ionisants [Internet]. Consulté le 15 août 2021. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Sante/rayonnements-ionisants-effets-radioprotection-sante/effets-rayonnements-ionisants/Pages/4-consequences-niveau-cellule.aspx#.YSPdSo4zaUk>
54. Universalis E. Radioprotection [Internet]. *Encyclopædia Universalis.* Consulté le 6 août 2021. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/radioprotection/>

55. McBride WH, Schae D. Radiation-induced tissue damage and response. *J Pathol.* avr 2020;250(5):647-55.
56. Rayonnements ionisants. Effets sur la santé - Risques - INRS [Internet]. Consulté le 14 août 2021. Disponible sur : <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-ionisants/effets-sur-la-sante.html>
57. Guionnet C. Exposition du patient en radiologie interventionnelle. *Le Manipulateur* ; No 197
58. 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.
59. IRSN. Réalisation des études dosimétriques de poste de travail présentant un risque d'exposition aux rayonnements ionisants. 2015. Report No.: 4.
60. Autorité de sûreté nucléaire. Rapport de l'ASN sur l'état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2018. 2018.
61. Autorité de sûreté nucléaire. Les doses [Internet]. Consulté le 4 juillet 2021. Disponible sur : <https://www.asn.fr/Informer/Dossiers-pedagogiques/Les-activites-controlees-dans-le-domaine-medical/La-radiologie-interventionnelle/Les-doses>
62. Le Roy M. La mesure au service de la radioprotection du patient. 2017 sept 26; *Laboratoire National Henri Becquerel.*
63. The European ALARA Network. Optimization of Radiation Protection ALARA: A Practical Guidebook. 2019.
64. Directive européenne Euratom 97/43 [Internet]. 1997. Consulté le 20 août 2021. Disponible sur : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31997L0043>
65. Recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique. 2007.
66. Les niveaux de référence diagnostiques [Internet]. Consulté le 3 septembre 2021. Disponible sur : <https://nrd.irsn.fr/presentation>
67. *Journal Officiel de la République française.* Arrêté du 23 mai 2019. mai 30, 2019.
68. Le point sur NRD, VGD, NRL : les indicateurs de dose en imagerie, et quoi transmettre à l'IRSN [Internet]. *Esprimed.* 2021. Consulté le 3 septembre 2021. Disponible sur : <https://esprimed.fr/2021/02/09/point-sur-nrd-vgd-nrl-irsn/>
69. Etard C, Bigand E, Salvat C, Vidal V, Beregi JP, Hornbeck A, et al. Patient dose in interventional radiology: a multicentre study of the most frequent procedures in France. *Eur Radiol.* oct 2017;27(10):4281-90.
70. König AM, Etzel R, Thomas RP, Mahnken AH. Personal Radiation Protection and Corresponding Dosimetry in Interventional Radiology: An Overview and Future

Developments. R \ddot{o} Fo - Fortschritte Auf Dem Geb R \ddot{o} ntgenstrahlen Bildgeb Verfahr. juin 2019;191(06):512-21.

71. Le DACS, partenaire de la qualit \acute{e} de la prise en charge radiologique [Internet]. Consult \acute{e} le 15 avril 2021. Disponible sur : <https://www.dsih.fr/article/1712/le-dacs-partenaire-de-la-qualite-de-la-prise-en-charge-radiologique.html>

72. Heilmaier C, Niklaus Z, Berthold C, Kara L, Weishaupt D. Improving Patient Safety: Implementing Dose Monitoring Software in Fluoroscopically Guided Interventions. J Vasc Interv Radiol. nov 2015;26(11):1699-709.

73. Miller DL, Kwon D, Bonavia GH. Reference Levels for Patient Radiation Doses in Interventional Radiology: Proposed Initial Values for U.S. Practice. Radiology. d \acute{e} c 2009;253(3):753-64.

74. Heilmaier C, Zuber N, Berthold C, Kara L, Weishaupt D. Establishing Local Diagnostic Reference Levels in IR Procedures with Dose Management Software. J Vasc Interv Radiol. mars 2017;28(3):429-41.

75. European Commission. Diagnostic Reference Levels in Thirty-six European Countries. Report No.: 180.

76. Miller DL. Review of air kerma-area product, effective dose and dose conversion coefficients for non-cardiac interventional fluoroscopy procedures. Med Phys. mars 2020;47(3):975-82.

AUTEUR : Nom : HAIDAR

Prénom : Mehdi

Date de soutenance : Vendredi 29 octobre 2021

Titre de la thèse : Établissement de NRD locaux pour les procédures de radiologie interventionnelle d'hémostase d'urgence : analyse des pratiques de 2015 à 2020.

Thèse - Médecine - Lille 2021

Cadre de classement : Radiologie

DES + spécialité : DES Radiodiagnostic et imagerie médicale

Mots-clés : Radiologie interventionnelle - Radioprotection - NRD - PDS - Kair

Résumé :

Objectifs de l'étude :

Établir les niveaux de référence diagnostique (NRD) locaux des gestes de radiologie interventionnelle d'hémostase aux urgences du CHU de Lille pour répondre aux recommandations européennes en vigueur.

Dresser un bilan des gestes réalisés par l'astreinte de radiologie interventionnelle.

Matériel et méthodes :

Recueil rétrospectif manuel des procédures endovasculaires réalisées par l'astreinte de radiologie interventionnelle du 7 avril 2015 au 1^{er} octobre 2020 dans la salle hybride des urgences du CHU de Lille. Étude de la distribution du produit dose surface (PDS) et du kerma dans l'air (Kair) (n = 1489 procédures). Analyses en sous-groupes selon les effectifs pour chaque indication.

Résultats :

Les analyses multivariées retrouvaient comme facteur de risque de dépassement du 75^{ème} percentile (NRD) du PDS le sexe masculin, l'âge, l'IMC, le temps de scopie, l'utilisation d'incidence oblique et d'acquisition volumique, et un nombre élevé d'images de graphies (p < 0,05). L'utilisation de la collimation était un facteur protecteur (p < 0,05).

Les NRD locaux se situaient en-dessous ou étaient du même ordre que les NRD promulgués et les données publiées dans la littérature. Le déploiement d'un système d'archivage de la dose (DACS) apparaît comme un outil prometteur en permettant un recueil automatisé et rapide tout en limitant le risque de données manquantes.

Conclusion :

La prise en charge des patients par embolisation d'hémostase aux urgences du CHU de Lille se fait dans le respect des principes de radioprotection, malgré le contexte aigu. Un logiciel d'archivage des doses facilite le suivi et l'évaluation des mesures de radioprotection.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Jean-Pierre PRUVO

Assesseurs : Monsieur le Professeur Jonathan SOBOCINSKI
Monsieur le Professeur François PONTANA
Madame le Docteur Delphine GARRIGUE-HUET

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Benjamin LONGERE