

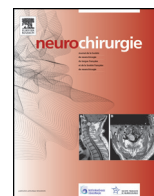


Disponible en ligne sur

ScienceDirect  
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte  
www.em-consulte.com



Article original

## Évaluation de l'exposition aux radiations du chirurgien lors d'un TLIF mini-invasif : comparaison entre fluoroscopie et navigation O-arm



### Assessment of the surgeon radiation exposure during a minimally invasive TLIF: Comparison between fluoroscopy and O-arm system

M. Grelat<sup>a,\*</sup>, F. Zairi<sup>b</sup>, M. Quidet<sup>b</sup>, P. Marinho<sup>b</sup>, M. Allaoui<sup>b</sup>, R. Assaker<sup>b</sup><sup>a</sup> Service de neurochirurgie, Bocage Central, CHRU de Dijon, 14, rue Paul-Gaffarel, 21000 Dijon, France<sup>b</sup> Service de neurochirurgie, hôpital Roger-Salengro, CHRU de Lille, rue Émile-Laine, 59037 Lille, France

## I N F O A R T I C L E

*Historique de l'article :*

Reçu le 23 octobre 2014

Reçu sous la forme révisée

le 1<sup>er</sup> février 2015

Accepté le 7 avril 2015

Disponible sur Internet le 10 juin 2015

*Keywords:*

Transforaminal lumbar interbody fusion  
Minimally invasive surgery  
Radiation exposure  
Intraoperative fluoroscopy  
Intraoperative O-arm navigation-assisted  
Radiation safety

## A B S T R A C T

**Introduction.** – Transforaminal lumbar interbody fusion with a minimally invasive approach (MIS TLIF) has become a very popular technique in the treatment of degenerative diseases of the lumbar spine, as it allows a decrease in muscle iatrogenic. However, iterative radiological controls inherent to this technique are responsible for a significant increase in exposure to ionizing radiation for the surgeon. New techniques for radiological guidance (O-arm navigation-assisted) would overcome this drawback, but this remains unproven.

**Objectives.** – To analyze the exposure of the surgeon to intraoperative X-ray during a MIS TLIF under fluoroscopy and under O-arm navigation-assisted.

**Materials and methods.** – This prospective study was conducted at the University Hospital of Lille from February to May 2013. Twelve patients underwent a MIS TLIF for the treatment of low-grade spondylolisthesis; six under standard fluoroscopy (group 1) and six under O-arm system (group 2). Passive dosimeters (rings and glasses) and active dosimeters for thorax were used to measure the radiation exposure of the surgeon.

**Results.** – For group 1, the average time of fluoroscopy was 3.718 minutes (3.13–4.56) while no radioscopy was performed on group 2. For the first group, the average exposure dose was 12  $\mu$ Sv (5–20  $\mu$ Sv) on the thorax, 1168  $\mu$ Sv (510–2790  $\mu$ Sv) on the main hand and 179  $\mu$ Sv (103–486  $\mu$ Sv) on the lens. The exposure dose was measured zero on the second group.

**Conclusion.** – The maximum recommended doses can be reached, mainly for the lens. In addition to the radioprotection measures, O-arm navigation systems are safe alternatives to significantly reduce surgeon exposure.

© 2015 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

## R É S U M É

*Mots clés :*

Arthrodèse lombaire transforaminale  
Chirurgie du rachis minimale invasive  
Exposition aux rayonnements  
Fluoroscopie peropératoire  
Neuronavigation O-arm peropératoire  
Sûreté radiologique

**Introduction.** – L'arthrodèse lombaire transforaminale par voie minimale invasive (TLIF MIS) est devenue une technique très populaire dans la prise en charge de nombreuses pathologies dégénératives du rachis lombaire, car elle permet une diminution de l'iatrogénie musculaire. Toutefois, les contrôles radiologiques itératifs inhérents à cette technique sont responsables d'une augmentation significative de l'exposition aux radiations ionisantes pour le chirurgien. Les nouvelles techniques de navigations O-arm permettraient de palier à cet inconvénient, mais ceci reste à démontrer.

**Objectifs.** – Mesurer l'irradiation reçue par le chirurgien au cours d'un TLIF MIS sous fluoroscopie et sous navigation O-arm.

**Matériels et méthodes.** – Cette étude prospective fut menée au CHU de Lille de février à mai 2013. Douze patients ont bénéficié d'un TLIF MIS pour le traitement d'un spondylolisthésis de bas grade. Le guidage fluoroscopique a été utilisé pour 6 patients (groupe 1) et la navigation O-arm pour 6 patients (groupe 2).

\* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : michael.grelat@gmail.com (M. Grelat), fahed.zairi@gmail.com (F. Zairi), mathilde.quidet@yahoo.fr (M. Quidet), jpaulo.marinho@yahoo.fr (P. Marinho), mohamed.allaoui@gmail.com (M. Allaoui), richard.assaker@chru-lille.fr (R. Assaker).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.neuchi.2015.04.002>

0028-3770/© 2015 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Des dosimètres passifs (bagues et lunettes) et des dosimètres actifs pour le thorax ont été utilisés afin de mesurer l'exposition du chirurgien aux radiations.

**Résultats.** – La durée moyenne de radioscopie était de 3,718 minutes (3,13–4,56) dans le groupe 1, alors qu'aucun cliché de radioscopie n'a été réalisé dans le groupe 2. Dans le groupe 1, la dose d'exposition moyenne était de 12  $\mu\text{Sv}$  (5–20  $\mu\text{Sv}$ ) sur le thorax, de 1168  $\mu\text{Sv}$  (510–2790  $\mu\text{Sv}$ ) sur la main dominante et de 179  $\mu\text{Sv}$  (103–486  $\mu\text{Sv}$ ) sur le cristallin. Dans le groupe 2, la dose d'exposition mesurée a été nulle.

**Conclusion.** – Les doses maximales recommandées peuvent être atteintes, principalement pour le cristallin. Outre les mesures de radioprotection, les systèmes de navigation (*O-arm*) représentent des alternatives sûres permettant de réduire de manière significative l'exposition du chirurgien.

© 2015 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

## 1. Introduction

L'arthrodèse lombaire transforaminale (TLIF) est une technique populaire pour le traitement de nombreuses pathologies dégénératives, telles que le spondylolisthésis ou la lombalgie discogénique. Cette technique permet de réaliser une arthrodèse circonférentielle avec un taux de fusion supérieur à 90%. Le principal inconvénient de cette technique est directement lié à la voie d'abord qui nécessite une désinsertion musculo-aponévrotique extensive. Les techniques minimales invasives se sont largement développées ces dernières années car elles ont démontré une diminution de l'iatrogénie opératoire. De plus, le TLIF par voie minimale invasive (TLIF MIS) a démontré des résultats cliniques et radiologiques à long terme similaires à la technique par voie classique, tout en diminuant la morbidité opératoire immédiate [1,2]. Cependant, le TLIF MIS nécessite des contrôles radioscopiques répétés, notamment durant la mise en place des implants pédiculaires et intersomatiques. L'exposition répétée aux radiations pour le chirurgien constitue actuellement la limite principale de cette technique [3]. Les techniques de navigation ont été nouvellement introduites dans le but de limiter l'exposition aux radiations pour le chirurgien, tout en garantissant une sécurité optimale lors de la mise en place des implants. Même si le TLIF MIS couplé à la navigation est une technique séduisante et en plein essor, son utilité reste à démontrer. Cette étude vise donc à comparer l'exposition du chirurgien aux radiations au cours d'une procédure TLIF MIS couplée à la navigation, par rapport à la procédure guidée par fluoroscopie.

## 2. Matériels et méthode

### 2.1. Critères d'inclusion

Cette étude prospective a été menée dans le service de neurochirurgie du CHU de Lille de février 2013 à mai 2013. Nous avons inclus les patients suivis dans notre institution pour un spondylolisthésis symptomatique, résistant au traitement conservateur depuis plus de 6 mois, pour lesquels un TLIF MIS sur un niveau a été indiqué. Nous avons exclu de cette étude tous les patients qui présentaient un antécédent chirurgical lombaire, une obésité morbide, une ostéopénie ou toute autre condition susceptible d'altérer la qualité des acquisitions fluoroscopiques. Les patients devant bénéficier d'une arthrodèse de plus d'un niveau ont également été exclus de cette étude.

### 2.2. Procédure chirurgicale

Tous les patients ont bénéficié d'une arthrodèse sur un segment par la même équipe chirurgicale, entraînée à cette procédure. Les patients ont été placés en décubitus ventral sur des billots, permettant d'optimiser la lordose lombaire. Deux incisions longitudinales de 4 cm ont été réalisées de part et d'autre de la ligne médiane. Un écarteur intermusculaire a ensuite été introduit en regard du massif articulaire. Du côté le plus symptomatique, une arthrectomie

complète a été réalisée pour assurer une décompression radiculaire large. Après avoir réalisé une discectomie extensive, des bougies de dilatations ont été introduites dans l'espace discal pour parfaire la réduction du spondylolisthésis et restaurer la hauteur foraminale. Une cage remplie d'os autologue a alors été introduite à la partie antérieure de l'espace intersomatique. Les vis pédiculaires ont ensuite été insérées selon la technique de visée percutanée (Fig. 1), à l'aide de la navigation ou sous contrôle fluoroscopique.

### 2.3. Techniques de guidage radiologique

Les patients ont été divisés en 2 groupes, en fonction de système de guidage radiologique utilisé. Pour le groupe 1, le guidage a été réalisé à l'aide d'un amplificateur de brillance (Siemens<sup>®</sup>), permettant d'acquérir des clichés de face et de profil au cours de l'intervention. Le positionnement des implants a été contrôlé au moyen d'un scanner réalisé dans la période postopératoire. Pour le groupe 2, le guidage a été assuré par le système d'imagerie chirurgicale multidimensionnelle type *O-arm* couplé à une station de navigation (StealthStation, Medtronic<sup>®</sup>). Le référentiel de navigation a été fixé sur la crête iliaque du patient. Le personnel du bloc ainsi que le chirurgien ont quitté la salle durant l'acquisition scannographique initiale, requise pour l'initiation du système de navigation. Le chirurgien a ensuite réalisé la mise en place des vis pédiculaires et de l'implant intersomatique sous contrôle de la navigation (Fig. 2). En cas de doute sur la fiabilité du guidage, le chirurgien pouvait réaliser des contrôles radioscopiques supplémentaires de face ou de profil au moyen de l'*O-arm*. En fin de procédure, un contrôle scannographique a été réalisé pour s'assurer du bon positionnement des implants (équipe chirurgicale hors de la salle).

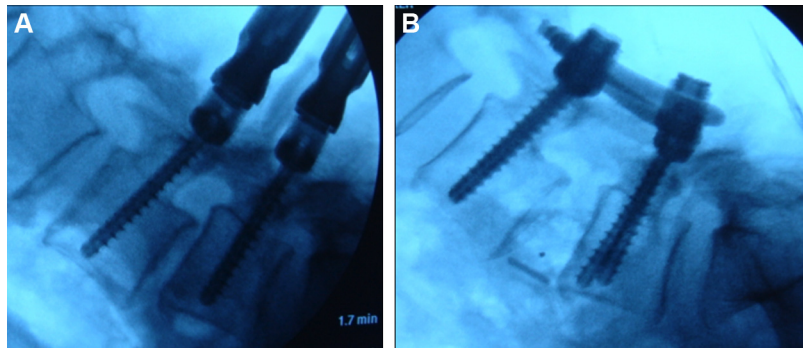
### 2.4. Techniques de mesure

Nous avons recueilli les doses reçues par le chirurgien à l'aide de trois capteurs mis en place avant l'intervention sur l'opérateur. Un dosimètre actif a été placé sous le tablier plombé pour mesurer l'irradiation sur le thorax. Un dosimètre passif de type *optically stimulated luminescence* (OSL), incrusté dans une bague a été placé sur l'annulaire de la main dominante du chirurgien pour mesurer l'irradiation à la main. Un dernier dosimètre passif, incrusté sur un serre-tête, permet de mesurer l'irradiation aux cristallins. Les données fournies par les dosimètres ont été recueillies par un ingénieur de radioprotection. L'exposition aux radiations a été enregistrée et exprimée micro sievert ( $\mu\text{Sv}$ ). Nous avons également recueilli le temps de radioscopie (en minutes).

## 3. Résultats

### 3.1. Population

Au total, 12 patients ont été inclus dans cette étude prospective. Six patients ont bénéficié d'un TLIF MIS guidé par amplificateur de



**Fig. 1.** Radiographie peropératoire de profil durant l'insertion d'implants pédiculaires de manière percutanée (A). Contrôle final (B) après réduction et mise en place de la cage intersomatique.

*Intraoperative radiograph depicting the percutaneous placement of pedicular screws (A). Final control after obtaining the réduction and placing the interbody cage (B).*

brillance (groupe 1) et 6 patients ont bénéficié d'un TLIF MIS guidé par la navigation *O-arm* (groupe 2). Il y avait 11 femmes et 1 homme avec un âge moyen de 59 ans (37–75 ans). Au total une arthrodèse a été réalisée sur le niveau L4/L5 chez 9 patients et sur le niveau L5/S1 chez 3 patients. Les données démographiques sont résumées dans le [Tableau 1](#).

### 3.2. Paramètres opératoires

La durée opératoire moyenne était de 176 minutes (160–215 minutes) pour le groupe 1 et de 205 minutes (165–251 minutes) pour le groupe 2. Le saignement opératoire estimé était <100 mL pour tous les patients des 2 groupes. À la lecture du scanner réalisé en fin d'intervention (groupe 2) ou dans la période postopératoire (groupe 1), aucune malposition d'implant n'a été rapportée.

### 3.3. Mesure de l'irradiation

La durée moyenne de radioscopie était de 3,718 minutes (3,13–4,56) dans le groupe 1, alors qu'aucun cliché de radioscopie n'a été réalisé dans le groupe 2.

Dans le groupe 1, la dose d'exposition moyenne était de 12  $\mu$ Sv (5–20  $\mu$ Sv) sur le thorax, de 1168  $\mu$ Sv (510–2790  $\mu$ Sv) sur la main dominante et de 179  $\mu$ Sv (103–486  $\mu$ Sv) sur le cristallin.

Dans le groupe 2, la dose d'exposition mesurée sur le thorax était de 0  $\mu$ Sv pour toutes les procédures. L'irradiation à la main

dominante et au cristallin était considérée comme nulle car inférieure au seuil de détection du dosimètre passif dans tous les cas.

## 4. Discussion

### 4.1. Exposition aux radiations

Les conséquences de l'exposition aux radiations ont été largement étudiées dans certaines disciplines médicales telles que la radiologie ou la cardiologie interventionnelle [4]. Une étude française multicentrique [5] a ainsi démontré une augmentation de la prévalence de la cataracte sous capsulaire postérieure chez les cardiologues interventionnels (17% vs 5%,  $p=0,006$ ). Cette forme rare de cataracte est connue pour être liée à l'exposition aux radiations ionisantes [6]. Les auteurs soulignent que l'application de mesures de protection (lunettes plombées) permettait de réduire significativement ce risque. De plus, ils insistent sur la nécessité de suivre les recommandations mondiales pour les travailleurs établies par l'International Commission on Radiological Protection (ICPR), dont les dernières recommandations officielles suivies par les gouvernements datent de 2007 [7]. Cette commission internationale de radioprotection a revu à la baisse les limites annuelles autorisées pour les travailleurs dans son communiqué de 2011 [8]. La dose annuelle limite pour le cristallin a ainsi diminué de 150 à 20 mSv/an.

### 4.2. Exposition en chirurgie rachidienne

En ce qui concerne la chirurgie rachidienne, on ne retrouve que peu d'études quantifiant les doses reçues par le chirurgien. Rampersaud et al. ont mené une étude *in vitro* pour mesurer la dose moyenne reçue par le chirurgien lors d'une instrumentation rachidienne (T11–S1) par vissage pédiculaire par abord classique, guidée par la fluoroscopie [9]. Les doses mesurées étaient 10 à 12 fois supérieures à celles mesurées lors des autres procédures



**Fig. 2.** Photographie opératoire durant une procédure guidée par la navigation *O-arm*.

*Intraoperative photograph during a MIS TLIF using the CT-guided navigation system.*

**Tableau 1**  
Données démographiques.  
*Demographical data.*

	Groupe 1	Groupe 2
<i>Sexe</i>		
Homme	1	0
Femme	5	6
<i>Âge (intervalles)</i>	53 ans (37–75)	65 ans (46–75)
<i>Niveau</i>		
L4/L5	4	5
L5/S1	2	1
<i>Durée (minutes)</i>	176 (160–215)	205 (165–251)
<i>Saignement (mL)</i>	<100	<100

orthopédiques guidées par la fluoroscopie. Les auteurs concluent à la nécessité d'une surveillance annuelle de l'exposition et au besoin de maintenir une distance de sécurité afin de réduire l'exposition aux radiations.

#### 4.3. Les techniques minimales invasives

Les techniques minimales invasives, visant à réduire la morbidité opératoire, sont susceptibles d'augmenter l'exposition aux radiations [10]. Effectivement, ces techniques nécessitent de réaliser des contrôles fluoroscopiques répétés, notamment pour la mise en place des implants. Fransen a démontré que la dose moyenne par vis pédiculaire est 3,2 fois plus élevée lors une insertion percutanée en comparaison à une approche conventionnelle [11].

La démocratisation et la multiplication des procédures minimales invasives ont récemment amené à une prise en conscience des chirurgiens du rachis sur l'importance de mesurer l'exposition peropératoire, afin de ne pas dépasser les doses annuelles maximales recommandées [12]. Concernant la kyphoplasty, Mroz et al. ont montré que la dose maximale pour le cristallin ou pour la main était atteinte après 300 procédures par an [13]. Pour le XLIF, Taher et al. ont montré que ces mêmes doses étaient atteintes après 2700 procédures par an [14].

#### 4.4. Le TLIF MIS

Dans une précédente étude, Bindal a mesuré l'exposition moyenne au chirurgien lors d'un TLIF MIS guidé par la fluoroscopie [15]. Il a retrouvé une exposition moyenne de 760  $\mu$ Sv sur la main et de 270  $\mu$ Sv sur le thorax malgré le port systématique d'un tablier plombé. Hormis son caractère « vulnérable », aucune mesure sur le cristallin n'a été réalisée dans cette étude. Dans notre série, nous avons retrouvé une exposition moyenne sur le thorax de 12  $\mu$ Sv. Cette différence majeure pourrait être liée à un placement différent du capteur ou à des modèles différents de tabliers plombés. L'exposition à la main est de 1168  $\mu$ Sv dans notre série. Cette valeur sensiblement supérieure pourrait en partie s'expliquer par le fait que nous avons pris soin de placer le capteur sur la main dominante dans chaque cas. Sur la base de nos données, la dose limite annuelle sur la main pourrait être atteinte après 427 procédures. Selon les nouvelles recommandations émises par l'ICPR, la dose limite annuelle pour le cristallin pourrait être atteinte après « seulement » 111 procédures.

Récemment, divers systèmes de navigation ont été développés afin de réduire cette exposition aux radiations. Certaines études ont effectivement montré des doses d'irradiation très faibles au moyen de cet outil [16]. Dans notre étude, l'irradiation mesurée était nulle. Rappelons que le chirurgien a systématiquement quitté la salle opératoire durant l'acquisition scannographique. De plus, s'agissant d'opérateurs entraînés à la technique, aucune acquisition radioscopique supplémentaire n'a été réalisée durant les procédures. Cet outil permet effectivement au chirurgien de réaliser des contrôles radioscopiques supplémentaires de face et de profil en cas de doute peropératoire.

Le système *O-arm* a montré sa fiabilité dans le positionnement des implants pédiculaires [17]. Dans notre série aucune malposition d'implant n'a été rapportée.

#### 4.5. Limites

Notre étude présente certaines limites. Tout d'abord, nous n'avons pas mesuré l'irradiation à la thyroïde, connue pour être un organe particulièrement radiosensible [18]. De plus, cette étude s'est focalisée sur l'exposition du chirurgien et nous n'avons pas mesuré l'irradiation reçue par le patient. L'exposition au chirurgien a été nulle au cours des procédures guidées par la navigation

*O-arm*. Même si l'exposition n'est que ponctuelle, il est probable que l'irradiation reçue par le patient soit supérieure. Après avoir vérifié le bon positionnement des implants en fin de procédure, il convient d'éviter de réaliser tout contrôle scannographique supplémentaire, afin de limiter l'exposition [19]. Finalement, toutes les procédures ont été réalisées par un chirurgien entraîné à ces 2 procédures de guidage radiologique. Il est probable que l'exposition soit supérieure pour un jeune chirurgien, ce qui présenterait un risque accru d'atteindre les doses maximales plus rapidement [20,21].

## 5. Conclusion

Les techniques minimales invasives sont responsables d'une augmentation significative de l'irradiation peropératoire. Les doses maximales recommandées peuvent être atteintes, principalement pour le cristallin. Outre les mesures de radioprotection, les systèmes de navigation (*O-arm*) représentent des alternatives sûres permettant de réduire de manière significative l'exposition du chirurgien.

## Déclaration d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts en relation avec cet article.

## Références

- [1] Zaïri F, Allaoui M, Thines L, Arikat A, Assaker R. Transforaminal lumbar interbody fusion: goals of the minimal invasive approach. *Neurochirurgie* 2013;59(4-5):171-7.
- [2] Wang J, Zhou Y, Zhang ZF, Li CQ, Zheng WJ, Liu J. Comparison of one-level minimally invasive and open transforaminal lumbar interbody fusion in degenerative and isthmic spondylolisthesis grades 1 and 2. *Eur Spine J* 2010;19(10):1780-4.
- [3] Houten JK, Nasser R, Baxi N. Clinical assessment of percutaneous lumbar pedicle screw placement using the O-arm multidimensional surgical imaging system. *Neurosurgery* 2012;70(4):990-5.
- [4] Mettler FA. Medical effects and risks of exposure to ionising radiation. *J Radiol Prot* 2012;32(1):N9.
- [5] Jacob S, Boveda S, Bar O, Brézin A, Maccia C, Laurier D, et al. Interventional cardiologists and risk of radiation-induced cataract: results of a French multicenter observational study. *Int J Cardiol* 2013;167(5):1843-7.
- [6] Lipman RM, Tripathi BJ, Tripathi RC. Cataracts induced by microwave and ionizing radiation. *Surv Ophthalmol* 1988;33(3):200-10.
- [7] ICPR. Recommendations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique.
- [8] ICPR. Statement on tissue reactions; 2011.
- [9] Rampersaud YR, Foley KT, Shen AC, Williams S, Solomito M. Radiation exposure to the spine surgeon during fluoroscopically assisted pedicle screw insertion. *Spine* 2000;25(20):2637-45.
- [10] Kruger R, Faciszewski T. Radiation dose reduction to medical staff during vertebroplasty: a review of techniques and methods to mitigate occupational dose. *Spine* 2003;28(14):1608-13.
- [11] Fransen P. Fluoroscopic exposure in modern spinal surgery. *Acta Orthop Belg* 2011;77(3):386-9.
- [12] Mariscalco MW, Yamashita T, Steinmetz MP, Krishnaney AA, Lieberman IH, Mroz TE. Radiation exposure to the surgeon during open lumbar microdiscectomy and minimally invasive microdiscectomy: a prospective, controlled trial. *Spine* 2011;36(3):255-60.
- [13] Mroz TE, Yamashita T, Davros WJ, Lieberman IH. Radiation exposure to the surgeon and the patient during kyphoplasty. *J Spinal Disord Tech* 2008;21(2):96-100.
- [14] Taher F, Hughes AP, Sama AA, Zeldin R, Schneider R, Holodny EI, et al. 2013 Young Investigator Award Winner: how safe is lateral lumbar interbody fusion for the surgeon? A prospective in vivo radiation exposure study. *Spine* 2013;38(16):1386-92.
- [15] Bindal RK, Glaze S, Ognoskie M, Tunner V, Malone R, Ghosh S. Surgeon and patient radiation exposure in minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion. *J Neurosurg Spine* 2008;9(6):570-3.
- [16] Kim CW, Lee YP, Taylor W, Oygar A, Kim WK. Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery. *Spine J Off J North Am Spine Soc* 2008;8(4):584-90.
- [17] Rivkin MA, Yocom SS. Thoracolumbar instrumentation with CT-guided navigation (*O-arm*) in 270 consecutive patients: accuracy rates and lessons learned. *Neurosurg Focus* 2014;36:E7.

- [18] Harstall R, Heini PF, Mini RL, Orler R. Radiation exposure to the surgeon during fluoroscopically assisted percutaneous vertebroplasty: a prospective study. *Spine* 2005;30(16):1893–8.
- [19] Bandela JR, Jacob RP, Arreola M, Griglock TM, Bova F, Yang M. Use of CT-based intraoperative spinal navigation: management of radiation exposure to operator, staff, and patients. *World Neurosurg* 2013;79(2):390–4.
- [20] Fitousi NT, Efstathopoulos EP, Delis HB, Kottou S, Kelekis AD, Panayiotakis GS. Patient and staff dosimetry in vertebroplasty. *Spine* 2006;31(23):E884–9 [discussion E890].
- [21] Bartal G, Vano E, Paulo G, Miller DL. Management of patient and staff radiation dose in interventional radiology: current concepts. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2014;37(2):289–98.