

ATSR 2022 – 22 septembre 2022  
27<sup>e</sup> congrès de radioprotection

## Défis en radioprotection hospitalière : radiologie interventionnelle et radiothérapie FLASH

**Jérôme DAMET, PhD**

Centre Hospitalier Universitaire Vaudois, Lausanne, Suisse  
Université d'Otago, Nouvelle-Zélande



Association Romande de Radioprotection

[www.arrad.ch](http://www.arrad.ch)





# Plan de la présentation

## Introduction

- Institute de radiophysique (IRA) à l'hôpital universitaire de Lausanne (CHUV)

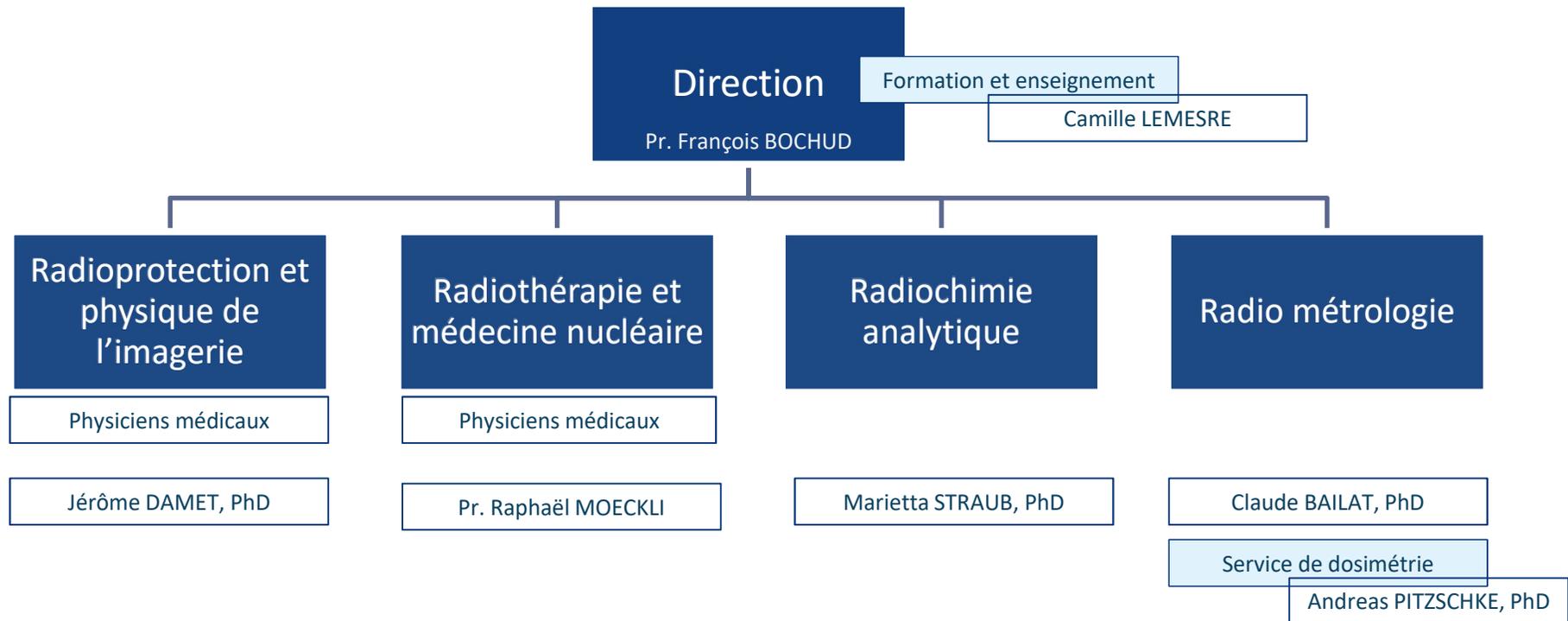
## Défis en radioprotection hospitalière et thèmes de recherche @ IRA

- Caractérisation des matériaux activés dans les cyclotrons médicaux
- Surveillance de l'incorporation de nouveaux radionucléides
- Scanner spectral (dosimétrie, nouvelles métriques d'évaluation de la qualité d'image et applications cliniques, notamment en inflammations articulaires)
- Exposition des mains en médecine nucléaire (EURADOS)
- Développement de modèles d'observateur pour l'évaluation de la qualité d'image
- **Caractérisation des champs de rayonnement diffus en radiologie interventionnelle**
- **Nouveau dispositif pour la radiothérapie flash**

## Conclusions

# Institut de radiophysique

L'Institut de radiophysique fait partie du département de radiologie médicale du CHU de Lausanne.



# Groupe de radioprotection et physique de l'imagerie



## Les missions du groupe:

- Fournir un soutien en matière de physique médicale en radiologie diagnostique, radiologie interventionnelle et dans les salles d'opération.
- Fournir un soutien pour tout problème de radioprotection à l'hôpital.
- Assurer un enseignement RP pour la formation de base et la formation continue du personnel médical
- S'engager dans des activités de recherche internationale pour améliorer continuellement la qualité de nos services.

## Axes de recherche principaux

- Modèles d'observateurs pour la caractérisation de la qualité des images diagnostiques
- Evaluation de la qualité de l'image dans le scanner spectral (nouvelles métriques)
- Evaluation des doses personnalisées pour les patients bénéficiant d'examen avec le scanner spectral MARS (basé les propriétés spécifiques des détecteurs Medipix).
- Caractérisation des champs de rayonnement diffus dans les salles de radiologie interventionnelle avec la puce Timepix pour une dosimétrie personnalisée (patient et personnel).



# Caractérisation du rayonnement diffusé dans les salles de radiologie interventionnelle

Joint CERN-IRA PhD work.  
Marie NOWAK, PhD



## Evolution de la législation (2018)

### Ordonnance sur la radioprotection (ORaP)

814.501

du 26 avril 2017 (Etat le 1<sup>er</sup> janvier 2022)

*Le Conseil fédéral suisse,*

vu la loi du 22 mars 1991 sur la radioprotection (LRaP)<sup>1</sup> et l'art. 83 de la loi fédérale du 20 mars 1981 sur l'assurance-accidents<sup>2</sup>,

*arrête:*

## Section 2 Limitation des doses

### Art. 56 Limites de dose

<sup>1</sup> La dose efficace reçue par les personnes professionnellement exposées aux radiations ne doit pas dépasser la limite de 20 mSv par année civile.

<sup>2</sup> Exceptionnellement, et avec l'accord de l'autorité de surveillance, ces personnes peuvent recevoir une dose efficace ne dépassant pas 50 mSv par année civile, pour autant que la dose cumulée au cours des cinq dernières années, y compris l'année en cours, soit inférieure à 100 mSv.

<sup>3</sup> Les limites de dose équivalente suivantes s'appliquent à ces personnes:

- a. pour le cristallin: 20 mSv par année civile ou 100 mSv pour la somme des doses sur une période de cinq années civiles consécutives, pour autant que la dose de 50 mSv ne soit pas dépassée durant une année civile;
- b. pour la peau, les mains et les pieds: 500 mSv par année civile.



**NOUVEAU**





Source: <https://www.houstonmethodist.org/imaging-radiology/interventional-radiology/>

La radiologie interventionnelle est une spécialité médicale qui fournit un diagnostic et un traitement des maladies par imagerie mini-invasive.



Systèmes mobiles de radiographie fluoroscopique d'arc en C

Tension du tube 40 – 120 kV<sub>p</sub>

Current 1 – 60 mA

Max 23 pulses par seconde

- ⇒ Défi : Caractériser le champ de rayonnement auquel est exposé le personnel médical
- ⇒ Objectif : Fournir une évaluation avancée de l'exposition





Source: <https://www.houstonmethodist.org/imaging-radiology/interventional-radiology/>

Dosimétrie du cristallin  
 Dosimétrie du corps entier  
 Dosimétrie des extrémités

$H_p(3)$   
 $H_p(10)$  and  $H_p(0.07)$ , souvent par double dosimétrie (sur et sous tablier de protection)  
 $H_p(0.07)$

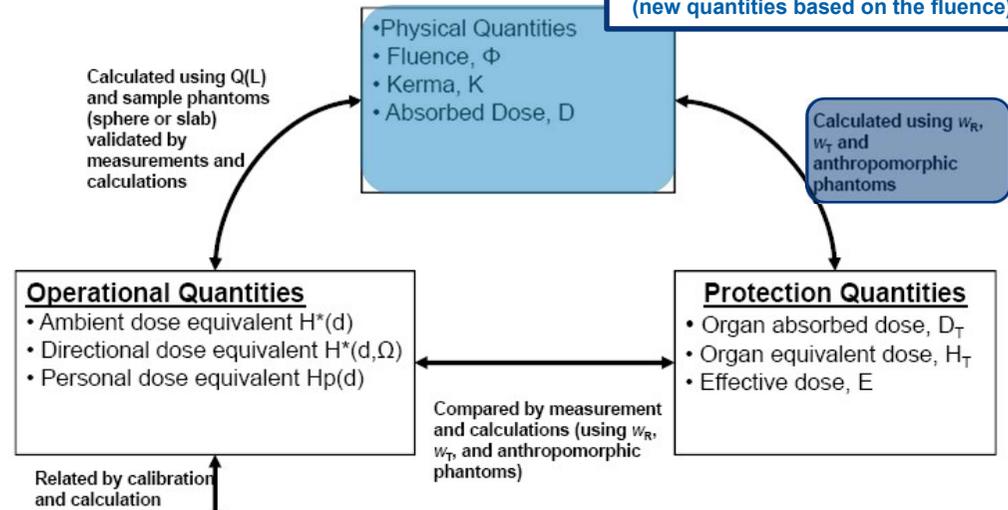


**Exposition non homogène**



Film radioprotection de l'OFSP  
<https://www.youtube.com/watch?v=8o7SQe5R8tU>

**Joint Report of ICRU and ICRP for Consultation:  
Operational Quantities for External Radiation Exposure  
(new quantities based on the fluence)**



**ICRP 116**

(245) In Fig. 5.8, the equivalent dose to the lens of the eye is compared with  $H^*(3)$  based on the data reported in ICRP Publication 51 (ICRP, 1987) for photon energies up to 10 MeV. It should be noted that the equivalent dose (Sv) is numerically the same as the absorbed dose (Gy) for photons and electrons. Although  $H^*(3)$  was not reported explicitly in ICRP Publication 51 (ICRP, 1987), the dose for parallel irradiation at a depth of 3 mm on the principal axis is equivalent to  $H^*(3)$ . It should be noted that the  $H^*(3)$  data were computed using the kerma approximation. It can be seen that

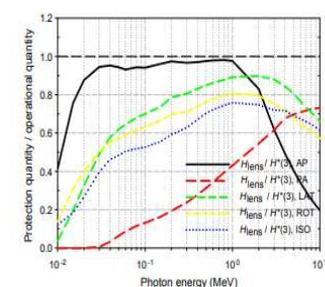


Fig. 5.8. Ratios of equivalent dose to the lens of the eye (present report) to  $H^*(3)$  for photons, based on data from ICRP Publication 51 (ICRP, 1987). AP, antero-posterior; PA, postero-anterior; LLAT, left lateral; RLAT, right lateral; ROT, rotational; ISO, isotropic.



- As long as the monitored quantities are below certain levels, compliance of the protection quantities with the legal dose limits is assured.
- Conversion coefficients provide relationships between operational and protection quantities, thus allowing organ and effective doses to be assessed in practice.



# Exposition du cristallin et du corps entier en radiologie interventionnelle

## Facteurs d'influence de l'exposition du personnel

Protections collectives



Procédures et expérience



Moyens de protection individuels



## Exposition du cristallin et du corps entier en radiologie interventionnelle

~ 99% des études sur le rayonnement en RI sont basées sur des MC. Très peu de mesures sont disponibles.

→ Lorsqu'elles sont disponibles, les mesures sont basées sur le débit de dose ambiant.

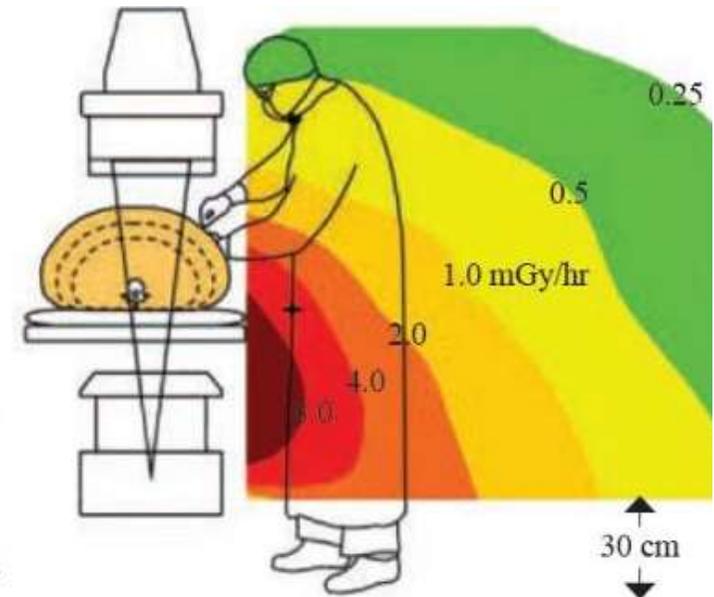
Les spectres en énergie sont bien connus pour les installations standards de radiologie ce n'est pas le cas pour les installations modernes de radiologie interventionnelle qui ajoutent des filtres en sortie de tube à rayons X pour réduire au minimum l'exposition du patient.  
La détermination des spectres en énergie s'avère toujours difficile

### Stray Radiation

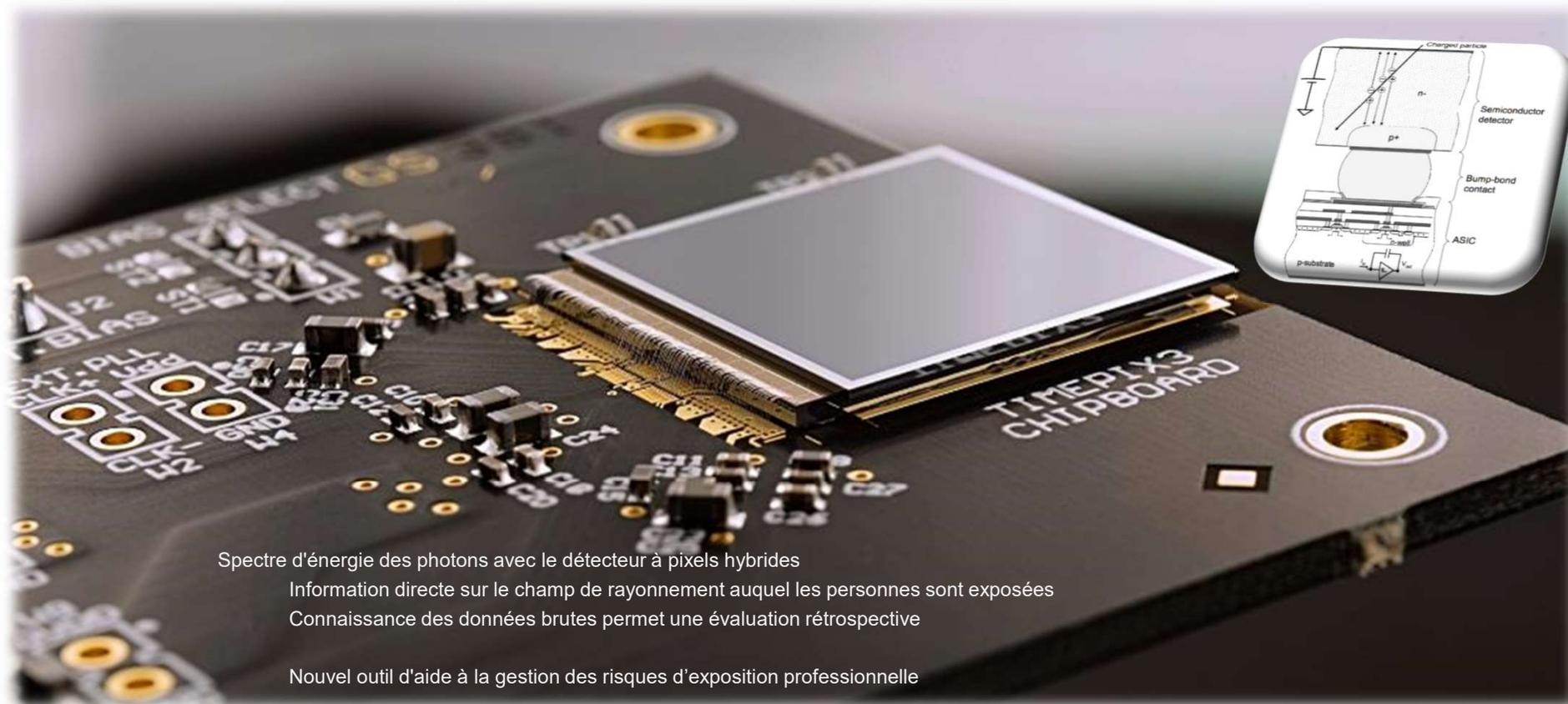
Operator Collar:  
0.75 mGy/hr  
Operator Waist  
5.7 mGy/hr

### Primary Radiation

Phantom:  
87 mGy/min  
Dap:  
1160 cGy-cm<sup>2</sup>/min



Source: Schueler, Beth, et. al. "An Investigation of Operator Exposure in Interventional Radiology," Mayo Clinic - Dept. of Radiology. *RadioGraphics* 2006. RSNA. Vol. 26, No. 5, p. 1533-1540.



Spectre d'énergie des photons avec le détecteur à pixels hybrides  
 Information directe sur le champ de rayonnement auquel les personnes sont exposées  
 Connaissance des données brutes permet une évaluation rétrospective  
 Nouvel outil d'aide à la gestion des risques d'exposition professionnelle

**Timepix3**

<b>pixel size</b>	<b>55 <math>\mu\text{m}</math> x 55 <math>\mu\text{m}</math></b>
<b>Matrix</b>	<b>256 x 256</b>
<b>Time resolution</b>	<b>1.56 ns</b>
<b>Dead time</b>	<b>40 Mcounts.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup></b>

# Etalonnage et caractérisation du détecteur pour le l'environnement hospitalier



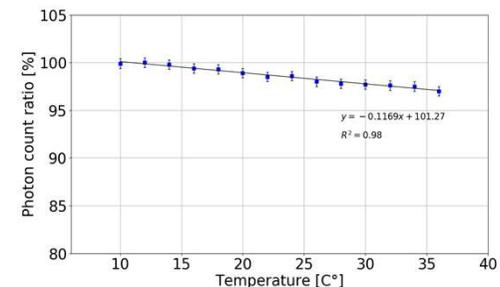
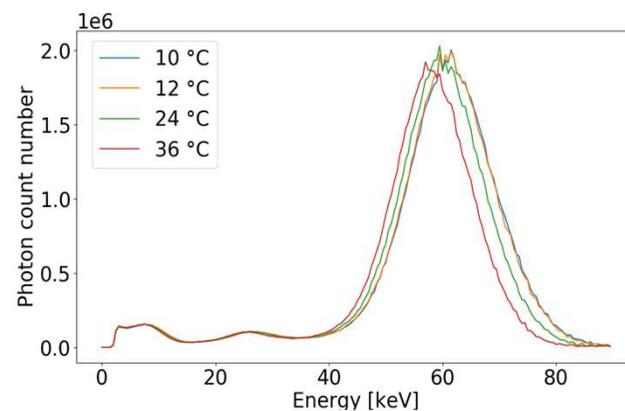
1 Calibration & characterisation of the detector

2 Characterisation of scattered radiation in interventional radiology theatre

3 Calculation of the dose



Response to angle, temperature, light



Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 981 (2020) 164502



Contents lists available at ScienceDirect  
Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A  
journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)



Characterisation of the impacts of the environmental variables on Timepix3 Si sensor hybrid pixel detector performance

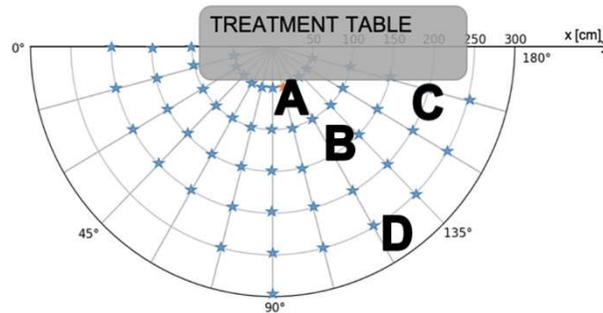
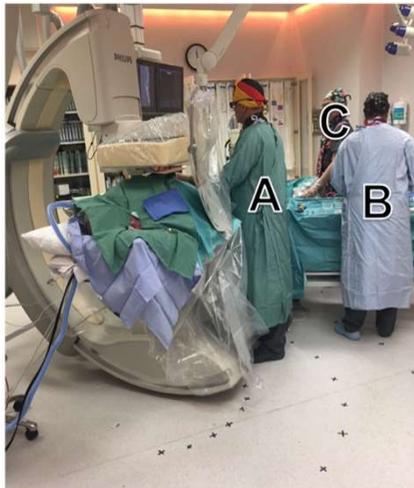
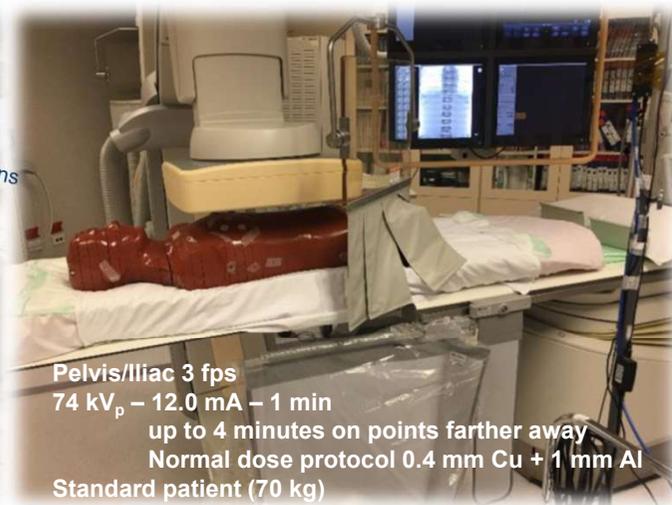
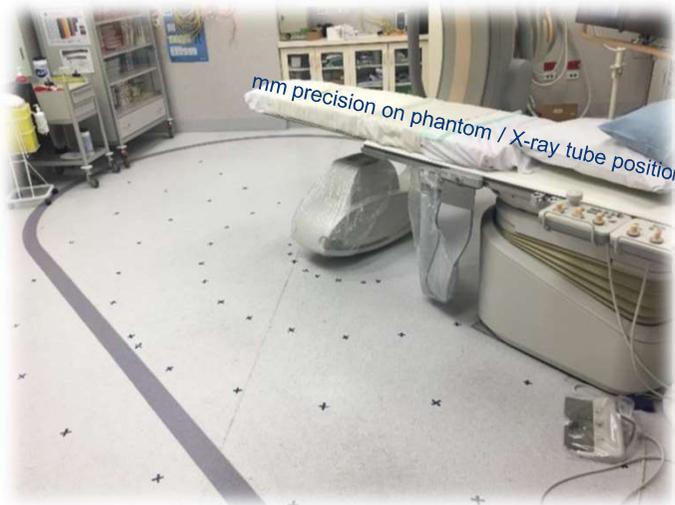
M. Nowak<sup>a,b,c</sup>, L. Tlustos<sup>b</sup>, P. Carbonez<sup>a,c</sup>, F.R. Verdun<sup>b</sup>, J. Damet<sup>a,b,c</sup>

<sup>a</sup> CERN, European Organization for Nuclear Research, Geneva, Switzerland

<sup>b</sup> Institute of Radiation Physics, Lausanne University Hospital and University of Lausanne, Lausanne, Switzerland

<sup>c</sup> Department of Radiology, University of Otago, Christchurch, New Zealand

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164502>



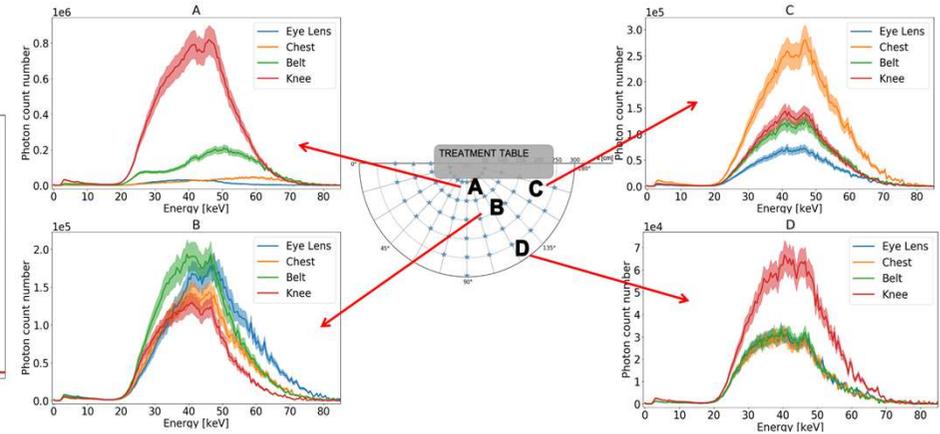
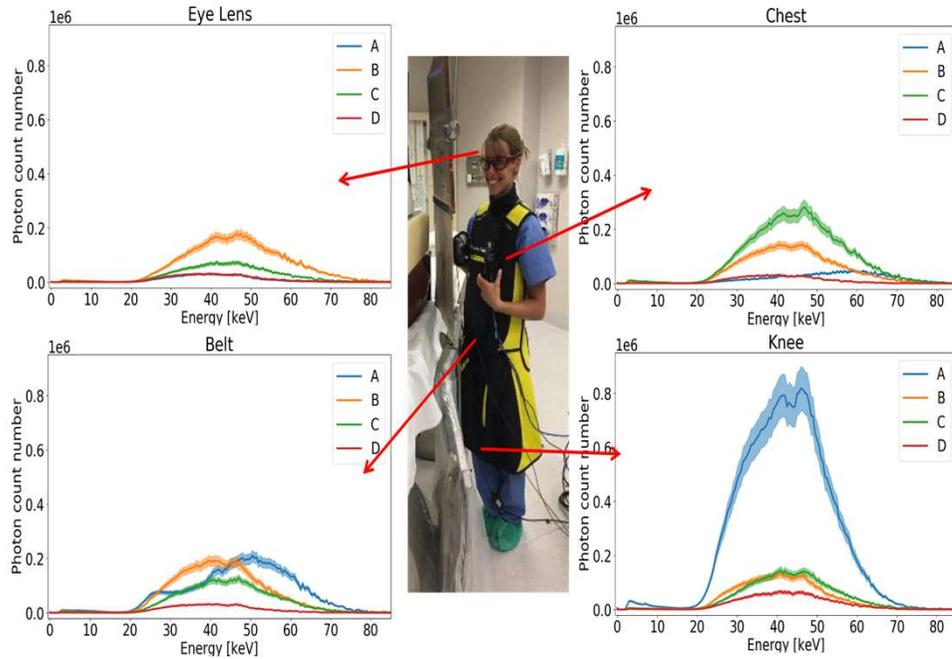
scientific reports  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-75257-5>

**OPEN** Characterisation and mapping of scattered radiation fields in interventional radiology theatres

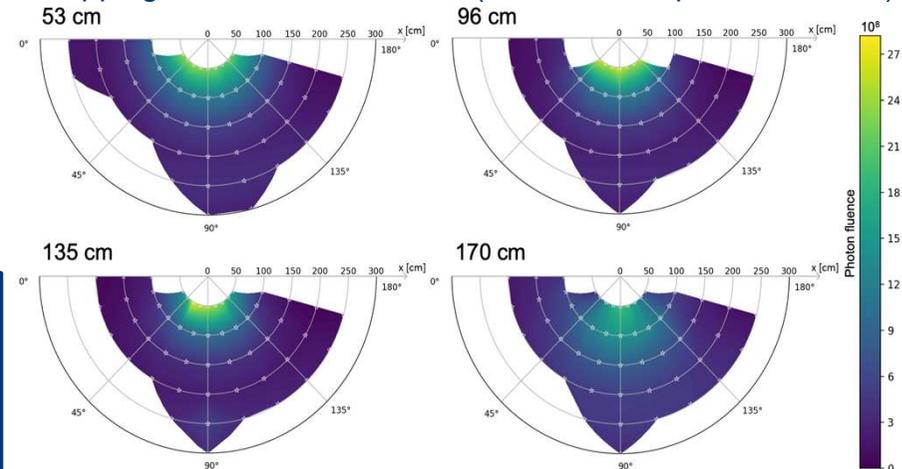
M. Nowak<sup>1,2,3\*</sup>, P. Carbonez<sup>1,3</sup>, M. Krauss<sup>1,4</sup>, F. R. Verdun<sup>1,4</sup> & J. Darnet<sup>1,2,3</sup>

We used the Timepix3 hybrid pixel detector technology in order to determine the exposure of medical personnel to ionizing radiation in an interventional radiology room. We measured the energy spectra of the scattered radiation generated by the patient during X-ray image-guided interventional procedures. We performed measurements at different positions and heights within the theatre. We first observed a difference in fluence for each staff member. As expected, we found that the person closest to the X-ray tube is the most exposed while the least exposed staff member is positioned at the patient's feet. Additionally, we observed a shift in energy from head to toe for practitioners, clearly indicating a non-homogeneous energy exposure. The photon counting Timepix3 detector provides a new tool for radiation field characterisation that is easier-to-use and more compact than conventional X-ray spectrometers. The spectral information is particularly valuable for optimising the use of radiation protection gear and improving dosimetry surveillance programs. We also found the device very useful for training purposes to provide awareness and understanding about radiation protection principles among interventional radiology staff.

## Caractérisation du rayonnement diffusé dans les salles de radiologie interventionnelle



## Mapping of scattered radiation (colour coded photon fluence)

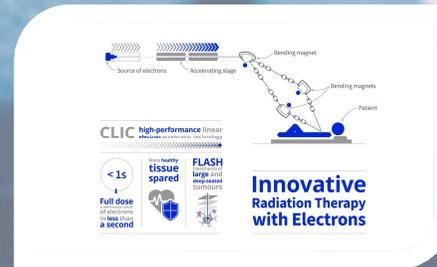


- ⇒ Nous avons réalisé la caractérisation complète de la puce Timepix3 en milieu hospitalier.
- ⇒ Nous avons validé la preuve de concept – Le détecteur Timepix3 peut être utilisé pour caractériser le rayonnement diffusé en radiologie interventionnelle.
- ⇒ Nous avons produit une cartographie 3D du rayonnement diffusé.
- ⇒ Intérêt pour une utilisation comme outil pédagogique / sensibilisation

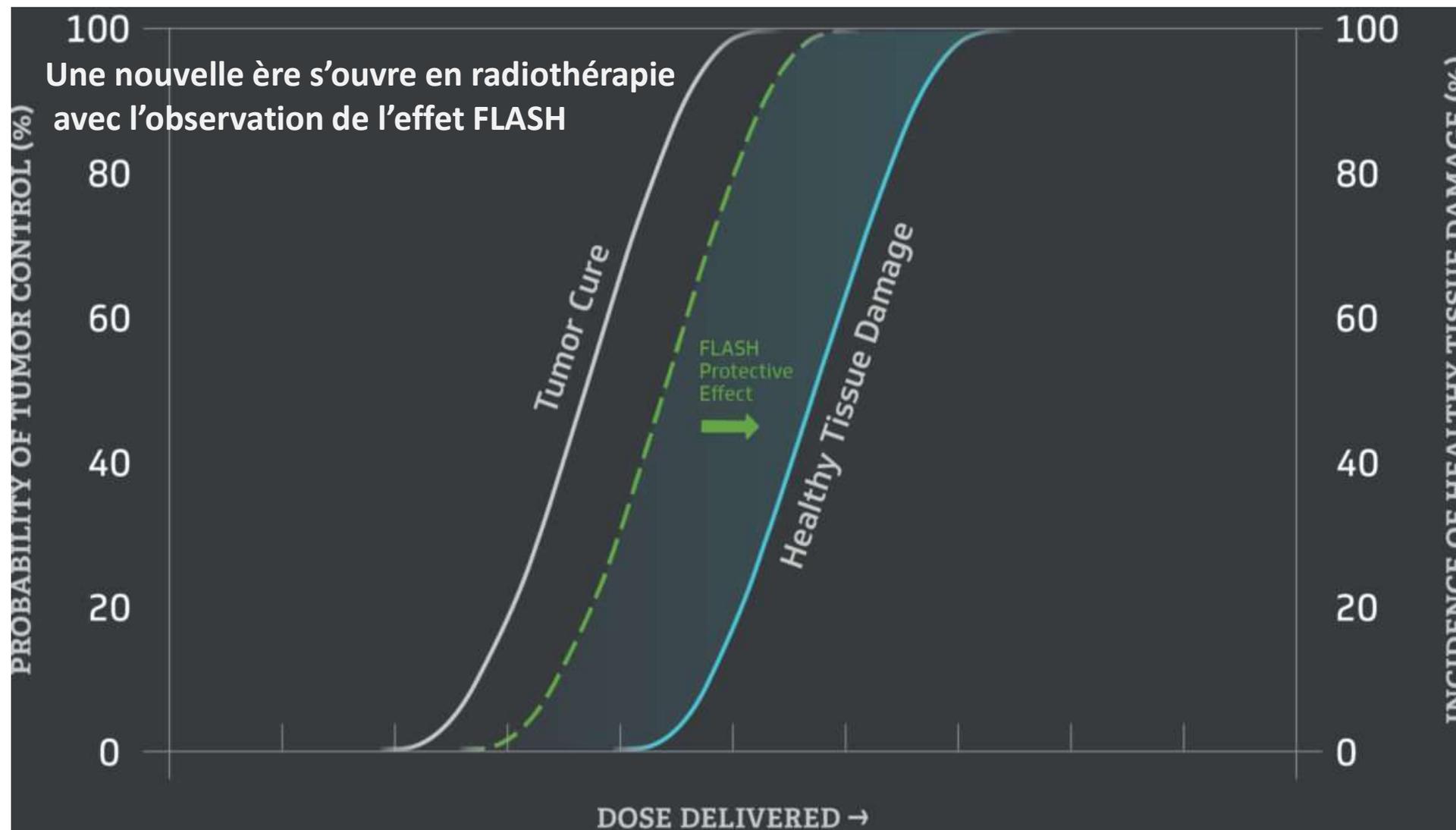
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-75257-5>



# La technologie des accélérateurs du CERN pour la radiothérapie



Une nouvelle ère s'ouvre en radiothérapie avec l'observation de l'effet FLASH



# Radiothérapie conventionnelle

**Ordonnance du DFI  
sur la radioprotection s'appliquant aux accélérateurs de  
particules utilisés à des fins médicales  
(Ordonnance sur les accélérateurs, OrAc)**

814.501.513

du 26 avril 2017 (Etat le 1<sup>er</sup> janvier 2018)

*Le Département fédéral de l'intérieur (DFI),  
vu les art. 12, al. 4, 32, al. 5, 36, al. 2, 79, al. 5, 88, 91 et 100, al. 3, de l'ordonnance  
du 26 avril 2017 sur la radioprotection (ORaP)<sup>1</sup>,  
arrête:*

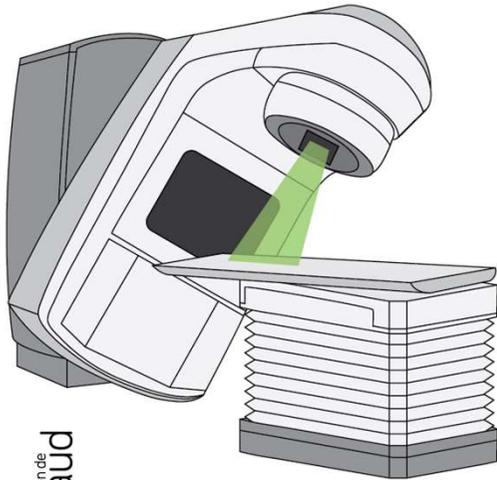
## Faisceaux conventionnels

Energie : 6 MeV (max 12 MeV pour les linacs)

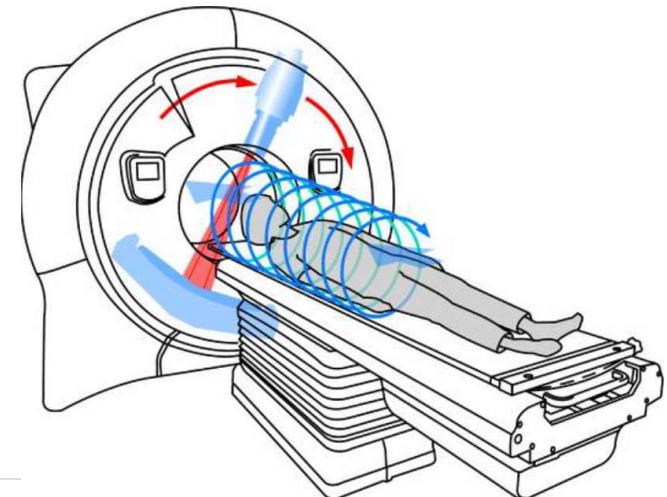
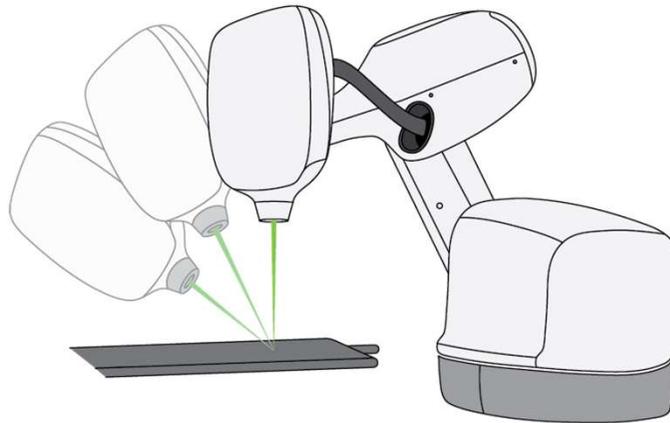
Débit de dose moyen: ~ 4 Gy/min

Durée du traitement : ~ minutes

LINAC



Cyberbistouri (CyberKnife)



<https://cancer.ca/fr/treatments/treatment-types/radiation-therapy/external-radiation-therapy>

<https://www.radiologen-konstanz.de/patienten/tomotherapie/>



Review

## FLASH Radiotherapy: Current Knowledge and Future Insights Using Proton-Beam Therapy

Jonathan R. Hughes<sup>1</sup> and Jason L. Parsons<sup>1,2,\*</sup> 

<sup>1</sup> Cancer Research Centre, Department of Molecular and Clinical Cancer Medicine, University of Liverpool, 200 London Road, Liverpool L3 9TA, UK; jonathan.hughes@liverpool.ac.uk

<sup>2</sup> Clatterbridge Cancer Centre NHS Foundation Trust, Clatterbridge Road, Bebington CH63 4JY, UK

\* Correspondence: j.parsons@liverpool.ac.uk; Tel.: +44-151-794-8848

Received: 31 July 2020; Accepted: 2 September 2020; Published: 5 September 2020



**Abstract:** FLASH radiotherapy is the delivery of ultra-high dose rate radiation several orders of magnitude higher than what is currently used in conventional clinical radiotherapy, and has the potential to revolutionize the future of cancer treatment. FLASH radiotherapy induces a phenomenon known as the FLASH effect, whereby the ultra-high dose rate radiation reduces the normal tissue toxicities commonly associated with conventional radiotherapy, while still maintaining local tumor control. The underlying mechanism(s) responsible for the FLASH effect are yet to be fully elucidated, but a prominent role for oxygen tension and reactive oxygen species production is the most current valid hypothesis. The FLASH effect has been confirmed in many studies in recent years, both *in vitro* and *in vivo*, with even the first patient with T-cell cutaneous lymphoma being treated using FLASH radiotherapy. However, most of the studies into FLASH radiotherapy have used electron beams that have low tissue penetration, which presents a limitation for translation into clinical practice. A promising alternate FLASH delivery method is via proton beam therapy, as the dose can be deposited deeper within the tissue. However, studies into FLASH protons are currently sparse. This review will summarize FLASH radiotherapy research conducted to date and the current theories explaining the FLASH effect, with an emphasis on the future potential for FLASH proton beam therapy.

L'effet FLASH est un effet biologique qui peut se produire lorsque la dose est délivrée dans un laps de temps très court. C'est pourquoi les faisceaux pulsés à très haut débit de dose sont utilisés pour déclencher l'effet FLASH.

# Flash Radiotherapy

**Conventional beams**

Mean dose-rate  
~ 4 Gy/min

Treatment time  
~ minutes



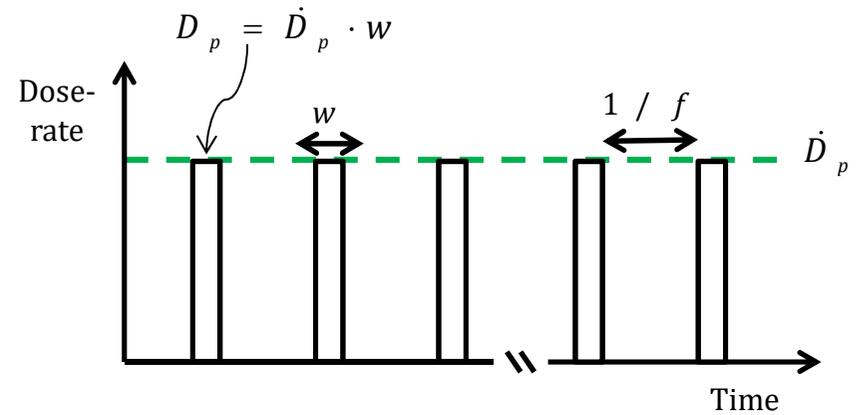
**High dose rate beams**

Mean dose-rate  
~100 Gy/s

Treatment time  
< 1 s



PMB Oriatron eRT6 @ Lausanne



$w$	pulse width	[0.5 – 4] $\mu\text{s}$
$f$	pulse repetition frequency	[100 - 200] Hz
$\dot{D}_p$	dose-rate in pulse	<b>[10<sup>3</sup> – 5.10<sup>6</sup>] Gy.s<sup>-1</sup></b>
$D_p = \dot{D}_p \cdot w$	dose per pulse	[10 <sup>-3</sup> – 10] Gy
$\dot{D}_m = \dot{D}_p \cdot w \cdot f$	mean dose-rate	[10 <sup>-2</sup> - 1000] Gy.s <sup>-1</sup>



Les nouvelles générations sont déjà prêtes à l'emploi avec un programme d'études pré-cliniques et d'applications cliniques chargé



Communiqué de presse - Lausanne et Sunnyvale (USA), le 21 juin 2020

### Le CHUV annonce sa collaboration avec IntraOp pour le développement de la radiothérapie FLASH

Le Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV) et l'entreprise californienne IntraOp Medical Corporation annoncent leur collaboration afin d'accélérer le développement de la radiothérapie FLASH en vue des premiers essais cliniques chez l'être humain.



Communiqué de presse - Lausanne, 15 juillet 2020

### Espoirs pour les patients oncologiques: une nouvelle technique développée au CHUV en première mondiale

Un nouvel appareil révolutionnaire développé par l'entreprise californienne IntraOp a été installé au CHUV en vue des premiers essais cliniques chez l'être humain en début d'année prochaine.



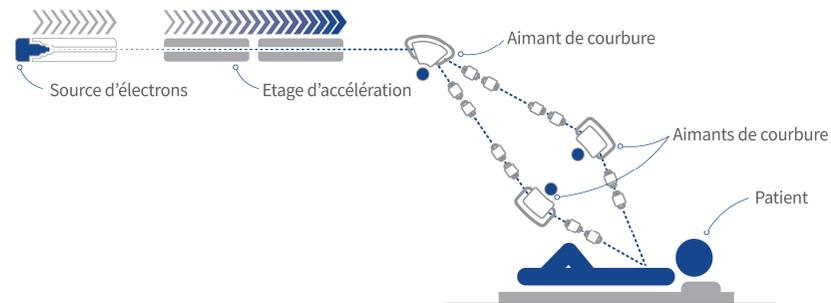
Nouveau bunker pour les projets FLASH



---

# Radiothérapie innovante à base d'électrons

---

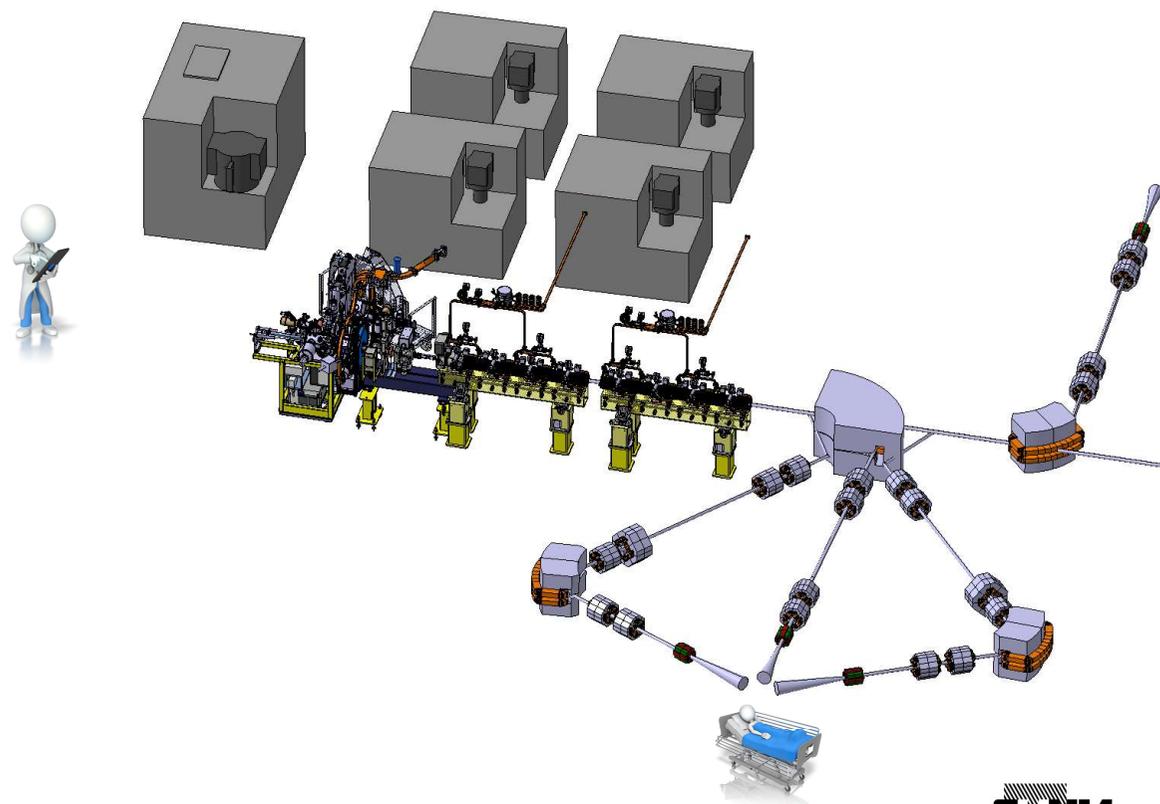


## Le CHUV et la Fondation ISREC annoncent une donation de 25 millions de francs suisses pour étendre le traitement par radiothérapie FLASH à tous les types de cancer

Le CHUV et la Fondation ISREC annoncent qu'un financement assure l'application clinique d'une technologie de radiothérapie de pointe, visant à traiter les types de cancer les plus résistants. Ce développement innovant de radiothérapie détruit de façon sélective les cellules tumorales tout en épargnant les tissus sains. Il pourrait être utilisé pour traiter par thérapie FLASH des patients atteints de différents cancers. Son entrée dans le domaine clinique serait une première mondiale. Cette donation de 25 millions de francs suisses permet d'étendre les efforts initiaux du CHUV en matière d'innovations dans le domaine de la radio-oncologie. Elle permettra aux spécialistes du CHUV de collaborer avec les experts en technologies d'accélération des particules du CERN afin de conceptualiser et de construire une plateforme de radiothérapie FLASH dédiée.

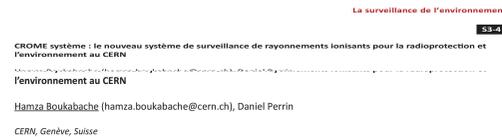
<https://www.chuv.ch/fr/chuv-home/espace-pro/journalistes/communiqués-de-presse/detail/le-chuv-et-la-fondation-isrec-annoncent-une-donation-de-25-millions-de-francs-suisses-pour-étendre-le-traitement-par-radiothérapie-flash-a-tous-les-types-de-cancer>

Projet DEFT (Deep Electron FLASH Therapy)  
VHEE (Very High Energy Electron)

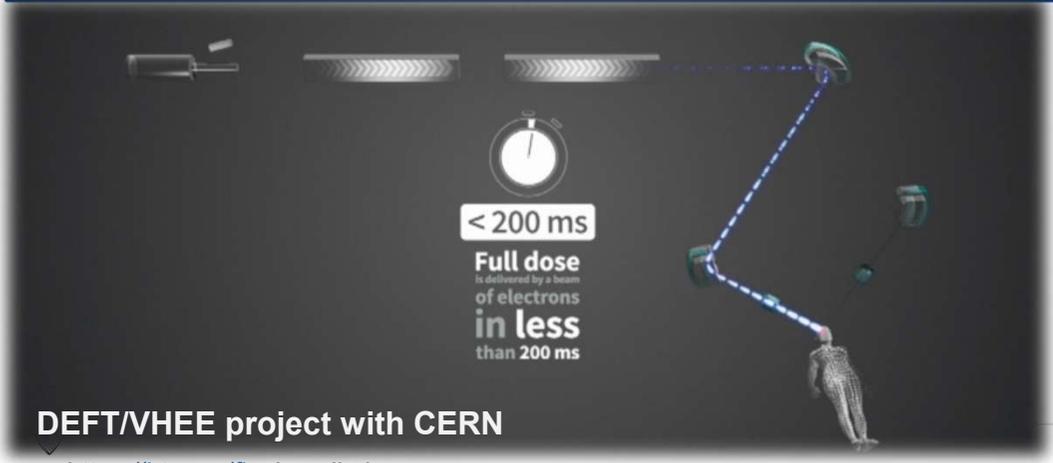


Outre les avantages pour les patients et la société, le projet apporte des défis majeurs en matière de caractérisation des faisceaux et de mise en service, en terme de:

- radioprotection
- métrologie
- dosimétrie
- physique médicale



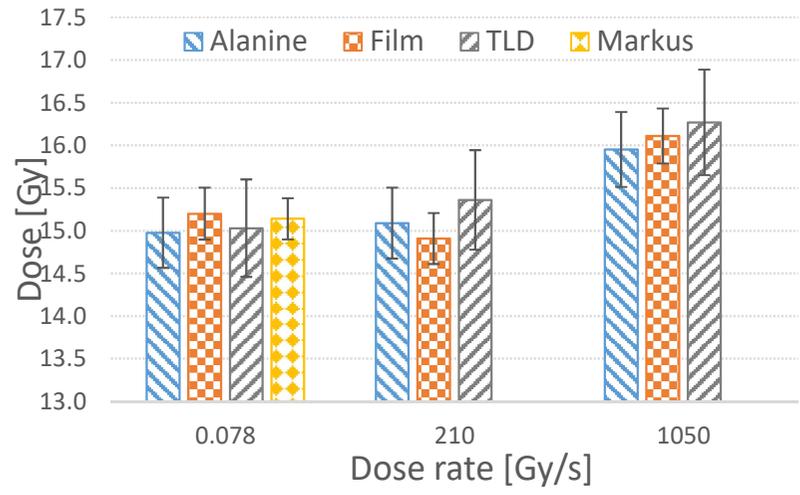
- ⇒ Défi RP : Caractériser les faisceaux pulsés courts à haut débit de dose et assurer le RP avec de nouveaux accélérateurs expérimentaux dans l'environnement hospitalier.
- ⇒ Objectif : développer des instruments dotés d'une électronique suffisamment rapide pour mesurer chaque impulsion (discussion pour établir une collaboration avec le CERN et le projet CROME).



<https://kt.cern/flash-radiotherapy>

**Dosimétrie absolue pour les faisceaux HDR**  
 Étalonnage par rapport à une norme nationale  
 Il n'existe pas de norme pour les faisceaux à Ultra haut débit de dose  
 Pas de traçabilité métrologique possible

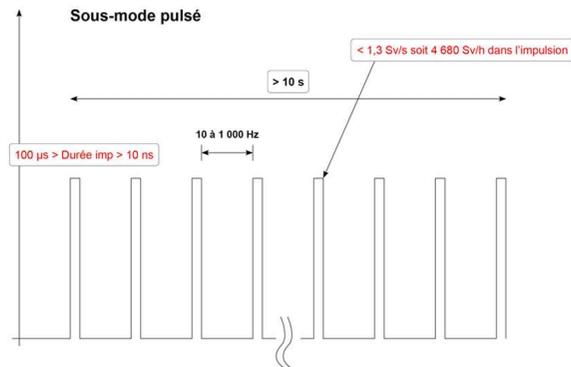
**Solution actuelle: Utilisation de la redondance**





RP actuellement

Défis pour RP et surveillance du faisceau



**Instrument indépendant  
de la dose totale cumulée (→ kGy)  
du débit de dose**

**Résistant au durcissement aux radiations ionisantes**

**Haute résolution temporelle**



# Conclusions

Les nouveaux défis en radioprotection hospitalière sont nombreux et touchent tous les domaines (imagerie, radio-oncologie, médecine nucléaire, ...)

Ces défis requièrent une étroite collaboration avec d'autres domaines pour apporter des réponses à la hauteur.



# Remerciements



Association Romande de Radioprotection  
[www.arrad.ch](http://www.arrad.ch)

Tous les collègues de l'IRA

Pierre Carbonez @ CERN



Knowledge Transfer

**Merci pour votre attention**

