

CONGRÈS SCIENTIFIQUE ANNUEL

12 au 18 novembre 2025

**ASSOCIATION QUÉBÉCOISE DES
PHYSICIEN(NE)S MÉDICAUX CLINIQUES**

NOS COMMANDITAIRES



SUN NUCLEAR
A MIRION MEDICAL COMPANY

 **Elekta**

varian

A Siemens Healthineers Company

vision**rt**

ACCURAY

RAD formation



MEDRON MEDICAL SYSTEMS INC.

COMING TOGETHER IN HEALTHCARE

**RaySearch
Laboratories**



DONALDSON MARPHIL

Medical

JOUR 5 :

TECHNIQUES DE TRAITEMENT ÉMERGENTES

MARDI 18 NOVEMBRE 2025

MODÉRATEURS : Alexandre Bourque, Horacio Patrocínio

HORAIRE	PRÉSENTATEUR	TITRE PRÉSENTATION
11h30 - 11h35		Ouverture de la session
11h35 - 11h55	Peter Martin Research Methodologist Nova Scotia Health	HyperSight-ARCHER study: Investigating target coverage and organ-at-risk sparing for adaptive radiotherapy of head and neck cancer with direct-dose calculation on next-generation CBCT imaging
11h55 - 12h15	Angela Trask Business Marketing Director Linac Solutions 	Adaptive for all – Online adaptive advances with Elekta C-arm linacs
12h15 - 12h30	Vansh Sandhu Étudiant à la maîtrise en physique médicale Université McGill	Monitoring Tumor Oxygenation to Improve Radiotherapy Outcomes for Non-Small Cell Lung Cancer (NSCLC)
12h30 - 12h45	Douaa El Abiad Étudiante à la maîtrise en physique médicale Université McGill	Beyond Dose–Volume Histograms: Spatial Dose Mapping for Head and Neck Toxicity Assessment
12h45 - 13h00	Yuliya Shpunarska Étudiant à la maîtrise en physique médicale Université McGill	Evaluation of the effect of motion on dose distribution for cardiac radio-ablation with a stereotactic radiosurgery linear accelerator
13h00 - 13h15	Sandra Simard Étudiante à la maîtrise en physique médicale Université de Montréal	Signatures biologiques précoces de la rt-FLASH: Effets protecteurs et hétérogénéité des dommages dans les modèles cellulaires 2D
13h15 - 13h30	Samuel Audet Étudiant au doctorat en physique Université de Montréal	PESO : une approche fondée sur la physique pour la modélisation du spectre énergétique d'un accélérateur linéaire compact UHDR

HyperSight-ARCHER study: Investigating target coverage and organ-at-risk sparing for adaptive radiotherapy of head and neck cancer with direct-dose calculation on next-generation CBCT imaging

Peter R Martin¹, R Lee MacDonald^{1,2,3}, James L Robar^{1,2,3}, Cheryl Anderson¹, Lucy Ward¹, Marc LeBlanc¹, Kenny Zhan¹, Jennifer DeGiobbi¹, Natasha McMaster^{1,2}, Murali Rajaraman^{1,2}, Lara Best^{1,2}, Derek Wilke^{1,2}, Amanda Cherpak^{1,2,3}

¹Department of Radiation Oncology, QE2 Cancer Centre, Nova Scotia Health, Halifax, Canada

²Department of Radiation Oncology, Dalhousie University, Halifax, Canada

³Department of Physics and Atmospheric Science, Dalhousie University, Halifax, Canada

Purpose/Objectives: This work investigates the potential benefit of adaptive planning using the Ethos radiotherapy system (Varian Medical Systems) with direct-dose calculation on HyperSight cone beam CT (CBCT) for subjects enrolled in the HyperSight-ARCHER trial¹ (ClinicalTrials.gov ID: NCT05666193). This next-generation CBCT platform has been demonstrated to have image quality that is improved over standard CBCT, and comparable to that of fan beam CT simulators.² HyperSight CBCT has also been demonstrated to allow for generally accurate dose calculation relative to planning CT;^{3,4} however a need remains to evaluate its utility in adaptive radiotherapy. Our hypothesis was that at fraction 21, adaptive planning would allow for improved planning target volume (PTV) coverage and organ-at-risk (OAR) sparing for head and neck (H&N) cancer patients, relative to the originally scheduled plan.

Materials/Methods: Twenty-four patients with H&N cancer (oropharynx and nasopharynx sites; prescribed 70 Gy/35 fractions) were imaged on Ethos with HyperSight (iCBCT Acuros reconstruction) on the same day as planning CT acquisition (Day 0), and again on fraction 21 of radiotherapy treatment. Structures were contoured on all image sets, with target contouring performed by radiation oncologists. For these subjects, clinically acceptable plans were created using the HyperSight CBCTs acquired at Day 0 and Day 21 (denoted Day 21-Adapted) with the same optimization directives. The Day 0 and Day 21 CBCTs were rigidly registered, and the Day 0 plans were forward-calculated on the Day 21 images (denoted Day 21-Original). The Day 21-Adapted and Day 21-Original plans were compared for PTV coverage and OAR sparing.

Results: Each metric presented in Table 1 demonstrates a statistically significant difference between the Day 21-Adapted and Day 21-Original plans ($p < 0.05$, Wilcoxon signed rank), indicating an increase in target coverage and decrease in brainstem, spinal cord and esophagus dose for the adapted plans. The differences in target dose between the Day 0, Day 21-Adapted and Day 21-Original plans for V100%, D99% and D95% in both the PTV high risk and PTV low risk groups are shown in Figure 1. At least one PTV coverage metric was clinically unacceptable for 21 out of 24 Day 21-Original plans (i.e. V100% < 93%, D99% < 6160cGy or D95% < 6650cGy for PTV-high risk; D99% < 5000cGy or D95% < 5320cGy for PTV-low risk). No significant differences were observed for any of these metrics between the Day 0 and the Day 21-Adapted plans.

Conclusions: The Ethos radiotherapy system with HyperSight allows for statistically significant improvement of target coverage and OAR sparing for H&N radiotherapy patients through adaptive planning at treatment fraction 21. These results highlight the dosimetric benefits of adaptive radiotherapy planning for H&N cancer patients, made efficient through direct dose calculation on CBCT.

[1] Cherpak A, et al. COMP 2024. Med Phys 2024;51(8):5785-5835.

[2] Robar JL, et al. PRO 2024;14:277-286.

[3] Martin PR, et al. phiRO 2025;34:100756.

[4] Sijtsema ND, et al. Radiother Oncol 2025;202:110596.

Table 1: PTV and OAR DVH data for Day 0, Day 21-Adapted and Day 21-Original plans

DVH data (median \pm IQR)	Day 0	Day 21-Adapted	Day 21-Original
PTV High V100%	95.10 \pm 0.58%	95.12 \pm 0.38%	90.94 \pm 4.67%
PTV High D99%	67.07 \pm 1.29 Gy	66.67 \pm 1.68 Gy	63.71 \pm 2.88 Gy
PTV High D95%	70.05 \pm 0.17 Gy	70.06 \pm 0.11 Gy	68.34 \pm 1.71 Gy
PTV Low D99%	53.83 \pm 1.50 Gy	53.47 \pm 1.84 Gy	50.49 \pm 4.92 Gy
PTV Low D95%	56.49 \pm 1.18 Gy	56.59 \pm 1.61 Gy	55.10 \pm 2.61 Gy
Brainstem Dmax	25.93 \pm 7.96 Gy	25.84 \pm 7.99 Gy	27.13 \pm 9.40 Gy
Spinal Cord Dmax	34.32 \pm 2.66 Gy	34.20 \pm 2.90 Gy	35.68 \pm 3.05
Esophagus Dmean	19.37 \pm 8.64 Gy	19.34 \pm 8.73 Gy	19.95 \pm 8.59 Gy

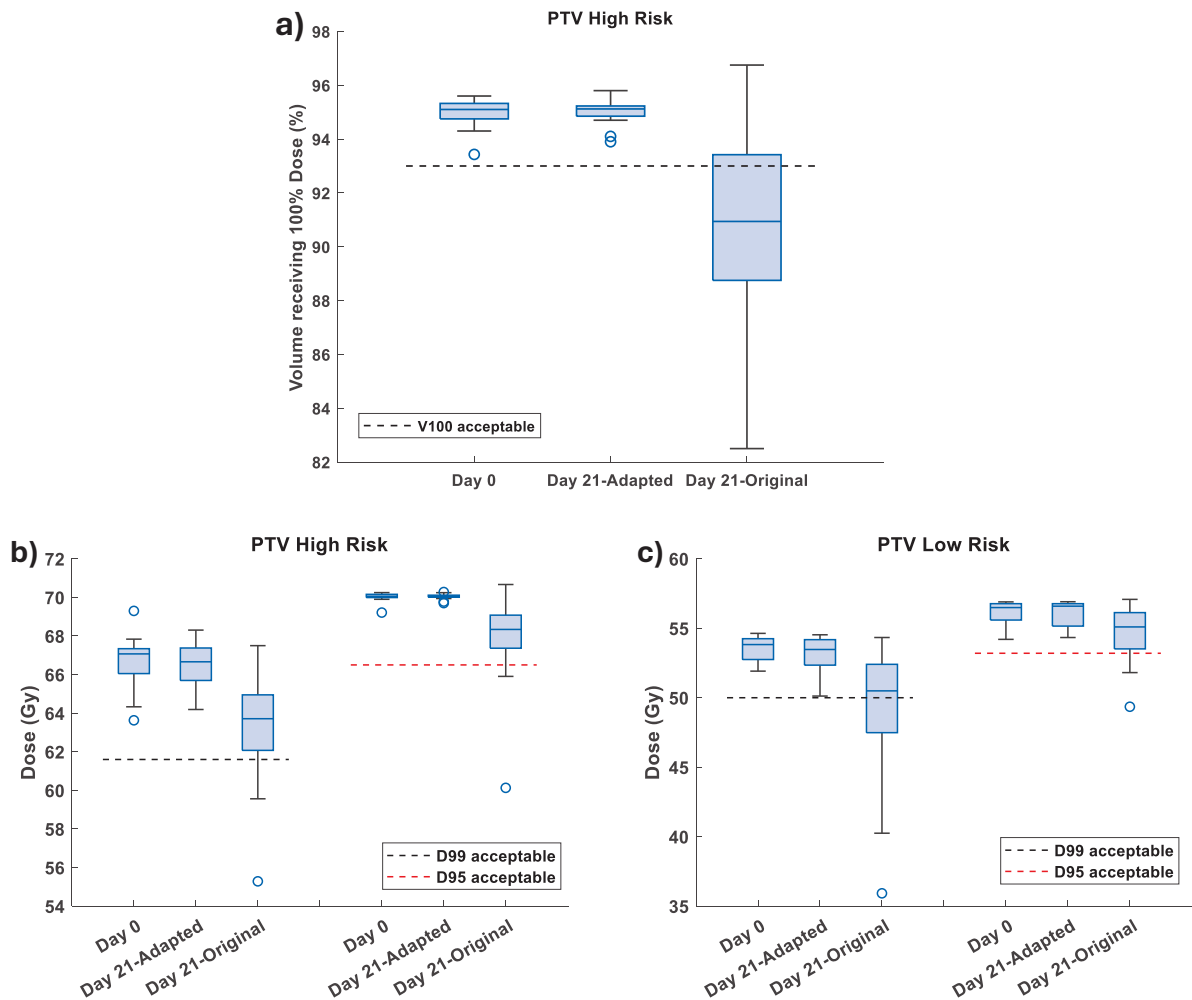


Figure 1 shows **a)** the PTV high risk volume receiving 100% of the prescribed dose (V100%), **b)** the doses covering 99% and 95% of the high risk PTV volumes (D99% and D95% respectively), and **c)** the D99% and D95% measures for the low risk PTV volumes, all for the Day 0, Day 21-Adapted and Day 21-Original plans. The dashed lines indicate the threshold of clinically acceptable values.

Monitoring Tumor Oxygenation to Improve Radiotherapy Outcomes for Non-Small Cell Lung Cancer (NSCLC)

Co-authors: Dr. Norma Ybarra, Dr. Ives Levesque, Jorge Campos

Background

Lung cancer is the leading cause of cancer-related mortality in Canada, with non-small cell lung cancer (NSCLC) representing 85–90% of all cases [1]. Current treatment options are surgery, adjuvant chemotherapy, and radiotherapy (RT), with RT playing a crucial role in the management of NSCLC, with over 50% of these patients receiving RT as part of their treatment [2]. However, the effectiveness of RT is strongly influenced by tumor oxygenation: oxygen fixates radiation induced DNA damage, while hypoxic tumors are more resistant to radiation, leading to poorer outcomes and increased recurrence [3]. Hypoxia is common in NSCLC, observed in 50–80% of tumors, and is associated with poor prognosis [4].

Although reoxygenation is one of the “classic 4Rs” of radiobiology, oxygenation is rarely monitored in real time during treatment. Existing imaging tools such as nitroimidazole PET tracers have value but are limited by cost, logistics, and reproducibility. Oxygen-enhanced MRI (OE-MRI) is a promising alternative that leverages the paramagnetic properties of dissolved oxygen during oxygen-breathing challenges, allowing repeated, non-invasive detection of hypoxia without ionizing radiation [5,6].

Hypothesis

Oxygen levels in hypoxic regions should remain stable during an oxygen challenge, allowing non-invasive identification of these areas. In addition, it will also be possible to identify other tumor regions which may become more oxygenated and radiosensitive.

Objectives

1. Establish and optimize a reproducible OE-MRI protocol for NSCLC tumor models.
2. Validate OE-MRI measurements via comparison using immunohistochemistry (IHC) with HIF1- α and CAIX, and perfusion marker CD31.
3. Assess whether OE-MRI can quantify tissue reoxygenation kinetics during RT.

Methods

Subcutaneous NSCLC tumours were established in mice using a syngeneic model. Following tumor growth and euthanasia, the tumors are sent for IHC to detect hypoxia markers (HIF1- α , CAIX) and vascularization (CD31) to confirm location of hypoxic areas.

For imaging, mice underwent OE-MRI scans under medical air, and the same scans were repeated while breathing 100% oxygen as a mechanism to modulate tissue and blood oxygenation. The imaging protocol included:

- T₂-weighted anatomical scans for spatial registration.
- T₁ mapping via variable repetition time acquisition, repeated under oxygen.
- T₂^{*} mapping via multi-gradient echo acquisition, repeated under oxygen.

Quantitative maps of R_1 ($1/T_1$) and R_2^* ($1/T_2^*$) were generated, for tissue and blood oxygenation, respectively.

Results

Imaging optimization in 2 pilot mice established an initial protocol combining anatomical T_2 -weighted scans with quantitative R_1 and R_2^* mapping. Subsequently, 14 mice underwent oxygen-breathing challenges. Firstly, for peripheral/non-tumor regions: R_2^* and R_1 mapping showed changes in some mice. Next, for central tumor regions: Negative or null signal changes were observed in R_1 maps and negative changes in R_2^* maps for two mice, consistent with hypoxia and poor oxygen saturation [5,6].

Pending IHC analysis will provide histological validation of these imaging-defined hypoxic areas.

Significance and Discussion

This project can potentially establish OE-MRI as a non-invasive, repeatable, and clinically translatable imaging tool for hypoxia detection in NSCLC. By mapping oxygen dynamics at the voxel level, OE-MRI could enable adaptive RT strategies to overcome hypoxia-driven resistance. Clinical implementation of this approach could allow: Identification of hypoxic subregions prior to RT planning, monitoring of reoxygenation kinetics during therapy, and personalization of RT fractionation schedules to maximize radiosensitivity and improve outcomes.

Given that hypoxia is a major driver of radioresistance and recurrence in NSCLC, this research aims to address a critical barrier in radiation oncology. If reproducibility and accessibility is established, translation of OE-MRI into the clinic could lead to more effective, personalized RT strategies and improved survival for NSCLC patients.

Conclusion

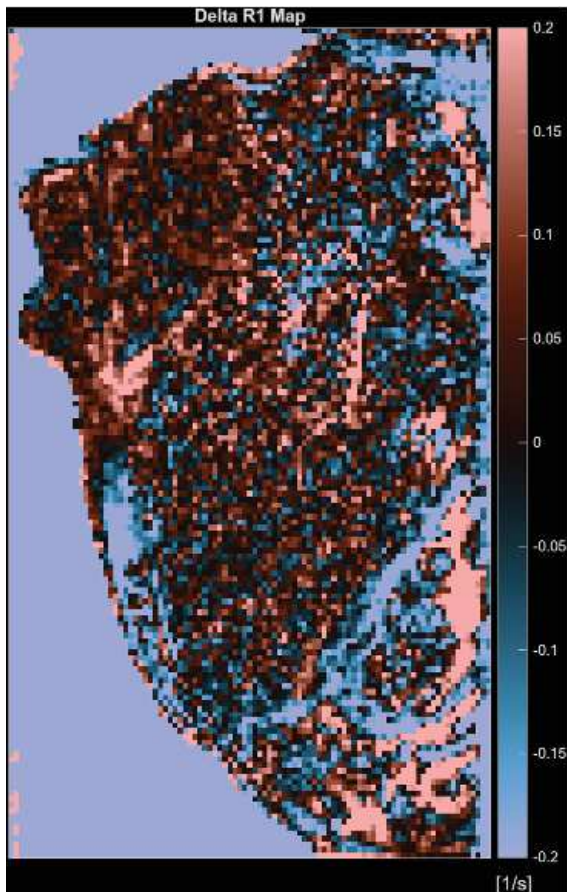
Preclinical OE-MRI can potentially detect hypoxic tumor regions and differentiate them from oxygen-responsive areas. With histological validation and further protocol refinement, OE-MRI could emerge as a clinically feasible biomarker to guide adaptive radiotherapy and improve treatment outcomes for NSCLC.

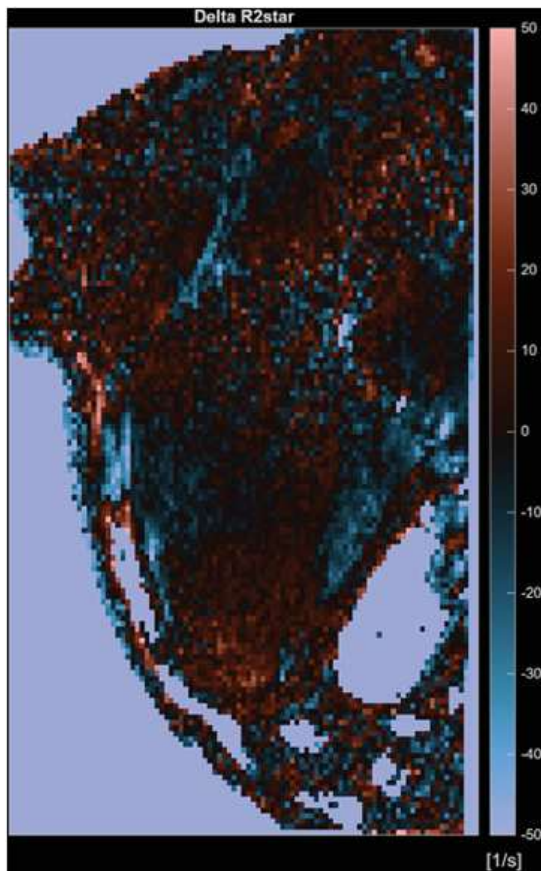
References

1. Molina JR, et al. Non-small cell lung cancer: epidemiology, risk factors, treatment, and survivorship. *Mayo Clin Proc.* 2008;83:584–94.
2. Salem A, et al. Targeting hypoxia to improve non-small cell lung cancer outcome. *J Natl Cancer Inst.* 2018;110:14–30.
3. Hill RP. Hypoxia and predicting radiation response. *Semin Radiat Oncol.* 2015;25:187–91.
4. Vaupel P, Mayer A. Hypoxia in cancer: significance and impact on clinical outcome. *Cancer Metastasis Rev.* 2007;26:225–39.

5. O'Connor JPB, Robinson SP. Imaging tumour hypoxia with oxygen-enhanced MRI and BOLD MRI. *Br J Radiol.* 2019;92:20180662.
6. Little RA, et al. Mapping Hypoxia in Renal Carcinoma with Oxygen-enhanced MRI. *Radiology.* 2018;288:739–47.

Figures





Authors: Douaa El Abiad, Odette Rios-Ibacache, Luc Galarneau & John Kildea

Beyond Dose–Volume Histograms: Spatial Dose Mapping for Head and Neck Toxicity Assessment

Background: Radiotherapy for head and neck cancer (HNC) is frequently complicated by toxicities experienced by critical structures such as the skin, oral cavity, parotid glands, and esophagus. Traditional dose–volume histograms (DVHs) summarize dose within volumes of interest but do not capture the spatial distribution of dose across organ surfaces, which can be critical for predicting toxicity. Dose-surface maps (DSMs) are a recently developed representation that “unwrap” a 3D organ or skin surface into a 2D map, enabling spatial visualization and quantitative analysis of dose patterns across complex anatomical surfaces. By preserving spatial information, DSMs allow the extraction of dosiomic features such as local hotspots, gradients, and percentile doses, which may provide greater predictive power for treatment-related toxicities than conventional volumetric measures.

Objectives: In this ongoing retrospective REB-approved study, we are analyzing 625 HNC patients (826 treatment plans) treated at the McGill University Health Centre. To date, toxicity grades have been extracted from clinical reports, and DSMs have been generated from planning CTs using the open-source software *rtdsm*, previously developed in our lab. Our initial focus is on radiation dermatitis, studying DSMs of the skin surface from lower face to the shoulders. Clinical and treatment-related factors (age, sex, BMI, smoking status, replanning status, prescription dose, fractionation) are being statistically examined for possible correlation with toxicity grade, alongside DSM-derived features such as mean and maximum surface dose and percentile doses. Spatial dose features are being developed.

Results: Preliminary DSMs have been visually validated against treatment planning dose distributions (Figures 1, 2). While DSMs generally reflect the dose distributions well, our initial approach of restricting the analysis to the lower face-to-shoulders skin surface may be too limiting. This is particularly relevant for cases involving the nasal cavities and sinuses, oropharynx, and oral cavity, which are commonly treated within head and neck radiotherapy. At the same time, the standard DSM-generation methods in *rtdsm* are unsuitable for highly curved facial structures superior to the chin. Furthermore, DSM computation must be performed with particular care in patients treated with bolus, especially within these anatomical categories, to ensure accurate surface dose representation.

Conclusion: Compared with conventional dose–volume histograms (DVHs), DSMs include important spatial dose information. However, the head and neck region is complex and our work has shown that adjustments to standard DSM-generation algorithms may be required.

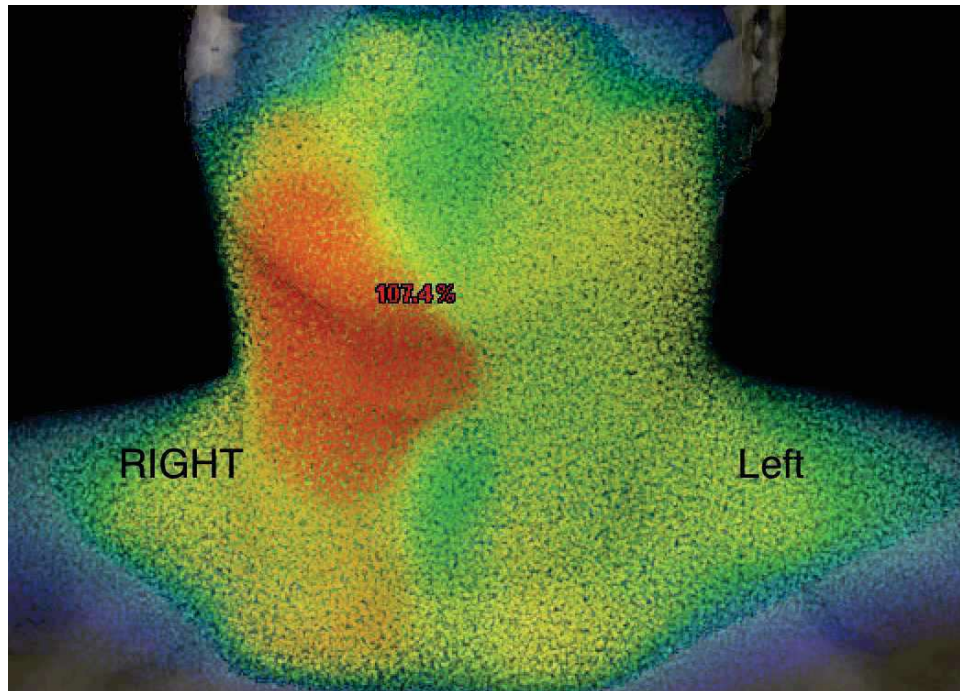


Figure 1. Dose distribution on the skin surface for a hypopharynx patient treated with VMAT to 70 Gy in 35 fractions.

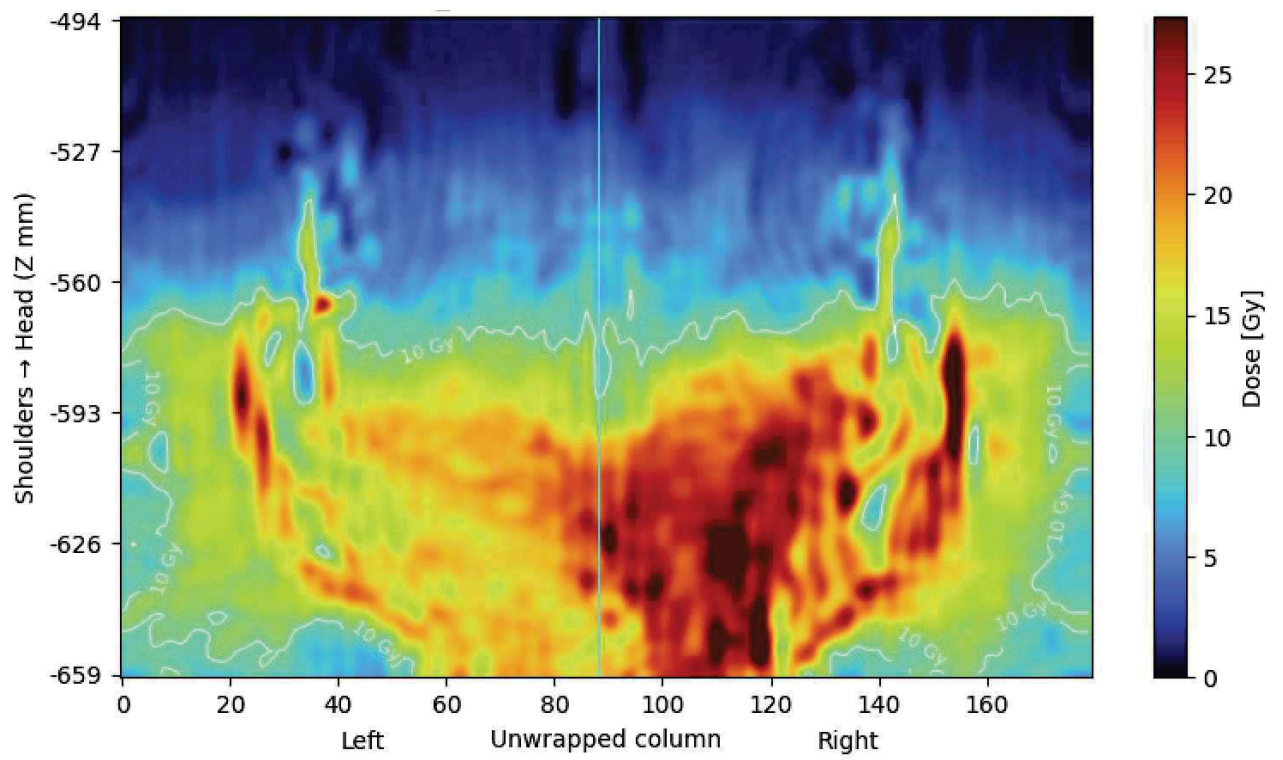


Figure 2. Dose-surface map (DSM) of the same patient as Figure 1.

Title: Evaluation of the effect of motion on dose distribution for cardiac radio-ablation with a stereotactic radiosurgery linear accelerator

Y. Shpunarska^{*a}, P. Dvorak^b, L. Knybel^b, J. Cvek^b

^a Medical Physics Unit, McGill University, Montréal, Canada

^b Department of Oncology, University Hospital Ostrava, Ostrava, Czech Republic

Abstract:

Cardiac radio-ablation (CRA) is a non-invasive treatment of refractory ventricular tachycardia using high-energy radiotherapy (RT) photons delivered to the heart. A key challenge in CRA for treating arrhythmias is the breathing and heartbeat motion, which make it difficult to deliver dose accurately to the target during treatment while avoiding damaging healthy tissue (Stevens RRF et al. 2023). The CyberKnife (Accuray Inc., Madison, WI) is a machine capable of delivering radiation precisely thanks to its robotic arm and ability to compensate for respiratory motion by creating a correlation model to adjust its position with sub-second precision (Knybel et al. 2016). The correlation model is continuously updated during treatment with new x-ray image acquisitions, and accounts for a correlation error between the actual position and the predicted position of the target for 8 phases of the breathing cycle. It was previously found that the correlation error in treatments of lung tumors is under 1 mm (Knybel et al. 2016); however, this error climbs to over 1 mm in cardiac treatments. The difference is attributed to the beating of the heart, which the CyberKnife does not account for in its correlation model.

In general, the motion of organs during RT causes blurring of the dose distribution, which can be modeled as a convolution. Following the technique described by Bortfeld et al. (2004), a probability density function (PDF) can be built from the correlation error found in CyberKnife log files. This represents the probability that the tracking target will be at a specific position away from the position predicted by the CyberKnife's correlation model. When the PDF is convolved with the planned (static) dose distribution obtained from the treatment planning system, the result is a more realistic blurred dose distribution.

We aim to quantify the effect of this blurring on the dose distribution for a cohort of 48 CRA patients treated at the University Hospital Ostrava (Ostrava, Czech Republic) with a CyberKnife. We compare the resulting dose statistics for the target and some organs at risk (OARs) with the dose constraints from the RAVENTA trial (Blanck et al. 2020) and AAPM Task Group 101. Preliminary results show that the dose blurring caused by unaccounted-for motion does not significantly impact dose conformity or dose limits. Important dose-limiting OARs for this treatment include the stomach and esophagus. Moreover, we show the effectiveness of CyberKnife breath motion tracking by comparing the blurred dose

distributions with simulated doses to target and OARs that would be delivered without motion tracking, i.e. with a conventional linear accelerator. An example of a dose-volume histogram (DVH) for one patient is shown in figure 1; the talk will show composite data for the cohort and present extreme cases. As the PDF method does not account for anatomical changes during the breathing cycle, this work could be improved by using deformable image registration of the planning CT images to capture the influence of deformation of surrounding structures, such as lung and bone near the target, on the final dose delivered.

I am currently on an exchange at the University Hospital Ostrava, returning to Montréal in early December. The McGill University Health Center (MUHC) has an established CRA program, with two clinical trials underway, and regularly receives referrals from other Quebec centers. CRA remains complex and reserved for large university-based centers despite interest from other centers. This work contributes to a larger goal of developing quality assurance (QA) methods and benchmarks for CRA and improving access of smaller centers to begin a CRA program.

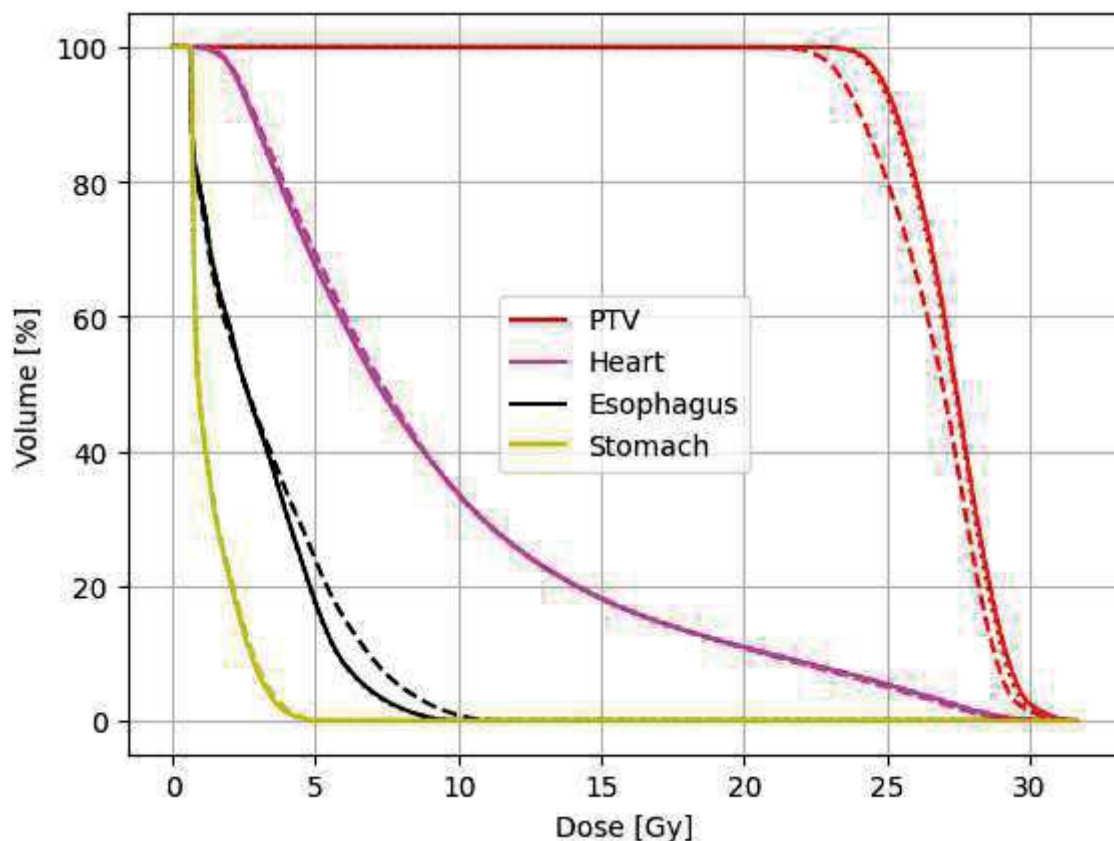


Figure 1. A sample dose-volume histograms (DVHs) for the PTV, heart, stomach and esophagus of one patient blurred by residual motion after respiratory compensation by the

CyberKnife (solid lines). Note the similarity to the static TPS-exported DVHs (dotted lines), used to evaluate dose constraints, and the difference to the simulated uncompensated DVHs (dashed lines) for the PTV and esophagus. This exemplifies the effectiveness of CyberKnife motion compensation for cardiac radioablation (CRA) compared to such a treatment on a conventional linear accelerator.

CONGRÈS ANNUEL DE L'AQPMC 2025

**Signatures biologiques précoces de la
rt-FLASH: Effets protecteurs et
hétérogénéité des dommages dans les
modèles cellulaires 2D**

Sandra Simard, Rodin Chermat, Rose Champoux, Thomas Gervais, Arthur
Lalonde
Université de Montréal
October 1, 2025

1 Résumé

Introduction

Le cancer constitue un problème majeur de santé publique pour lequel la radiothérapie est un traitement de première ligne. Toutefois, malgré les avancées technologiques, la radiothérapie conventionnelle reste associée à une toxicité importante pour les tissus sains, limitant la dose maximale administrable. Dans ce contexte, la radiothérapie FLASH (rt-FLASH) suscite un intérêt croissant. L'« effet FLASH » correspond à l'observation selon laquelle une irradiation délivrée à ultra haut débit de dose UHDR (typiquement > 40 Gy/s) maintient une efficacité tumoricide comparable, tout en réduisant significativement les lésions dans les tissus normaux. Les faisceaux d'électrons constituent aujourd'hui la modalité la plus accessible pour générer de telles conditions UHDR, et des instruments comme le Mobetron permettent d'étudier des modèles expérimentaux *in vitro* et *in vivo* afin de mieux comprendre les paramètres biologiques et physiques déterminant l'apparition de l'effet FLASH.

Objectifs

La radiobiologie de la radiothérapie FLASH est un champ de recherche récent où de nombreuses questions fondamentales restent à élucider, notamment en ce qui concerne les mécanismes sous-jacents et les paramètres qui modulent son effet protecteur. Les modèles *in vitro* constituent un outil précieux pour isoler et examiner ces processus de façon systématique. Dans ce travail, nous présentons des résultats centrés sur l'utilisation du γ H2AX comme biomarqueur précoce de cassures double brin de l'ADN dans des monocouches cellulaires 2D, afin d'évaluer la présence d'un effet protecteur du FLASH ainsi que les profils de dommages associés.

Méthodologie

Trois modèles cellulaires ont été étudiés : CCD (fibroblastes colorectaux sains), HCT116 (cancer colorectal) et FaDu (cancer épithélial). Les irradiations ont été réalisées à l'aide d'un Mobetron e-LINAC hospitalier à 9 MeV, en modes conventionnel (CONV) et FLASH, à des doses de 4, 8 et 12 Gy. L'exactitude du dépôt de dose a été validée par des simulations Monte Carlo et par des mesures indépendantes sur films, avec un accord de 1–2 % entre les valeurs prévues et mesurées. Les cellules ont été fixées 45 minutes post-exposition, et l'intensité du marquage γ H2AX a servi à quantifier les dommages à l'ADN, tandis que l'hétérogénéité intercellulaire a été mesurée à l'aide du coefficient de variation (CV).

Résultats

Comme le montre la Figure 1, nos résultats mettent en évidence un effet protecteur du

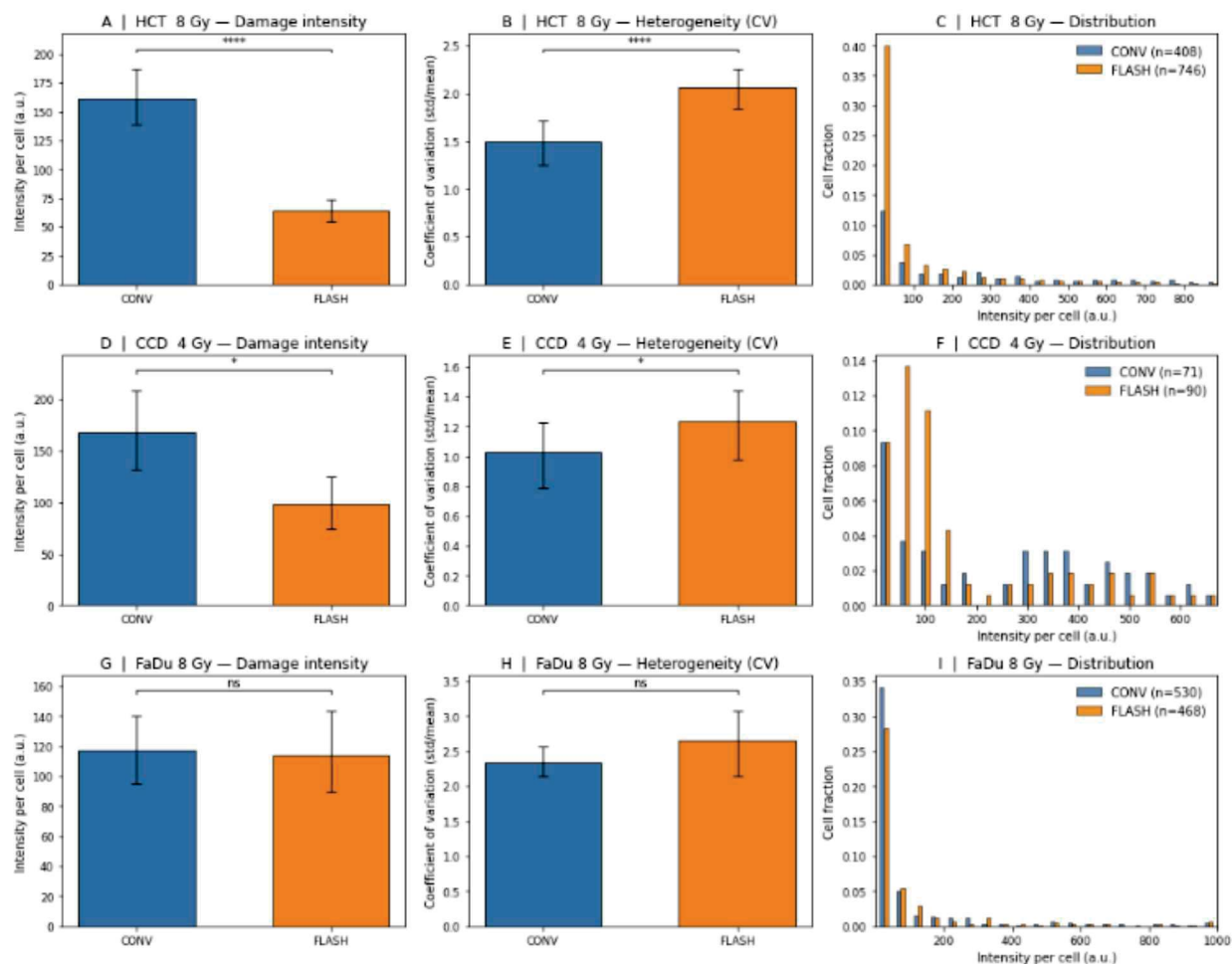


Figure 1: A) Graphique de l'intensité du γ H2AX par cellule montrant l'effet protecteur de la rt-FLASH dans la lignée cancéreuse colorectal HCT116. B) Graphique du CV pour la mesure de l'hétérogénéité dans les HCT116, avec un CV plus élevé en rt-FLASH. C) Distribution normalisée des dommages à travers les cellules, suggérant une proportion plus importante de cellules non affectées en rt-FLASH. D) Intensité du γ H2AX par cellule dans la lignée fibroblastique colorectal CCD. E) Graphique du CV pour les CCD, avec un CV plus élevé en FLASH-RT. F) Distribution normalisée des dommages à travers les cellules, suggérant une proportion plus importante de cellules non affectées en rt-FLASH. G) Graphique de l'intensité du γ H2AX par cellule montrant l'absence d'effet protecteur de la rt-FLASH dans la lignée cancéreuse épithéliale FaDu. H) Graphique du CV pour les FaDu, sans différences observées entre FLASH et CONV. I) Distribution normalisée des dommages à travers les cellules, suggérant l'absence d'effet différentiel en rt-FLASH.

FLASH dans les modèles CCD et HCT116, mais à des doses distinctes, respectivement 4 Gy et 8 Gy. Remarquablement, dans ces conditions spécifiques où le phénomène de « FLASH sparing » est observé, nous notons une augmentation de l'hétérogénéité intercellulaire (hausse du CV), traduisant une distribution plus large des dommages γ H2AX. L'analyse des distri-

butions normalisées révèle, pour les CCD et les HCT116, une proportion accrue de cellules faiblement endommagées sous irradiation FLASH, ce qui suggère que l'effet protecteur ne se limite pas à une simple diminution globale des dommages mais reflète une redistribution du profil de réponse cellulaire. En revanche, pour les cellules FaDu, aucun effet FLASH protecteur ni variation du CV n'a été observé.

Conclusion

Ces observations fournissent de nouvelles données suggérant que l'irradiation par électrons FLASH peut amplifier l'hétérogénéité préexistante liée au cycle cellulaire dans l'induction de dommages de bris double brins, ouvrant ainsi une piste sur les processus physico-chimiques impliqués dans le phénomène. Notre plateforme 2D démontre la pertinence de l'étude des distributions de dommages à l'échelle unicellulaire, et prépare le terrain pour des études 3D sur sphéroïdes multicellulaires pour lesquelles les lignées étudiées ici ont été validées. Celles-ci permettront d'explorer plus finement l'influence de la géométrie d'oxygénation et des paramètres physiques des pulses (durée, nombre, fréquence) sur la signature biologique du FLASH.

PESO : une approche fondée sur la physique pour la modélisation du spectre énergétique d'un accélérateur linéaire compact UHDR

Samuel Audet¹, Hugo Bouchard¹ et Arthur Lalonde^{1,2,3}

¹Département de Physique, Université de Montréal, Campus MIL, 1375 Av. Thérèse Lavoie-Roux, Montréal, QC H2V 0B3, Canada

²Centre de recherche du Centre hospitalier de l'Université de Montréal, Montréal, QC H2X 0A9, Canada

³Centre hospitalier de l'Université de Montréal, Montréal, QC H2X 3E4, Canada

E-mail : samuel.audet@umontreal.ca

Résumé

Introduction. La radiothérapie FLASH (FLASH-RT) consiste à délivrer des débits de dose ultra-élevés (UHDR, Ultra High Dose Rate) supérieurs à 40 Gy/s, permettant de maintenir un excellent contrôle tumoral tout en limitant les dommages aux tissus sains, phénomène connu sous le nom d'*effet FLASH*. La FLASH-RT par faisceau d'électron nécessite des calculs de dose précis pour permettre une transition clinique éventuelle. La méthode Monte Carlo demeure la référence en matière de fiabilité dosimétrique pour les électrons, mais elle requiert une modélisation réaliste du spectre énergétique. Or, cette tâche s'avère complexe dans le cas des accélérateurs compacts UHDR dépourvus d'aimants de courbure. Contrairement aux linacs conventionnels, où un modèle d'énergie gaussien est souvent suffisant, les linacs UHDR présentent des distributions spectrales plus complexes, incluant une composante de basse énergie significative. Dans ces conditions, les méthodes heuristiques de reconstruction manquent fréquemment de robustesse.

Méthodologie. Une nouvelle approche, nommée *Physics-based Energy Spectrum Optimization* (PESO), a été développée afin d'intégrer la dynamique relativiste des électrons dans le champ électrique du guide d'ondes lors de la recherche de la solution. À la différence des méthodes classiques telles que la régression gaussienne (GR) ou le recuit simulé (SA), cette approche contraint la solution à un espace de spectres physiquement plausibles, tout en limitant le nombre de paramètres libres. L'algorithme a été validé expérimentalement au moyen de films radiochromiques placés dans des fantômes d'eau solide et irradiés avec le Mobetron (IntraOp, Sunnyvale, CA), en modes conventionnel et FLASH, pour des faisceaux de 6 et 9 MeV et trois tailles d'applicateurs (25, 40 et 60 mm).

Résultats. Les résultats obtenus mettent en évidence les performances supérieures de PESO en termes de précision et de stabilité. Pour le faisceau de 6 MeV en mode UHDR, caractérisé par une structure multi-pics, la méthode a permis de reconstruire les différentes composantes du spectre, assurant une correspondance améliorée entre isodoses simulées et mesurées. En comparaison, la méthode gaussienne échoue à représenter correctement les composantes de basse énergie, conduisant à une sous-estimation de la dose en surface et une surestimation en profondeur. Le recuit simulé a généré des solutions plus flexibles, mais souvent instables, avec des contributions de basses énergies exagérées. Pour le faisceau de 9 MeV en mode UHDR, PESO et SA ont produit des résultats comparables et supérieurs à GR, tandis qu'en mode conventionnel, les trois méthodes ont convergé vers des spectres similaires. L'analyse gamma a confirmé les taux de réussite supérieurs atteints par PESO pour les faisceaux complexes. Enfin, une étude de sensibilité a montré que PESO est nettement moins affecté par l'introduction de bruit gaussien, contrairement au recuit simulé, dont les reconstructions deviennent instables.

Discussion. Ces observations soulignent les avantages de PESO par rapport aux approches traditionnelles. En contraignant l'espace de solution à des spectres physiquement cohérents, la méthode concilie flexibilité et robustesse face aux incertitudes expérimentales. Elle offre en outre une capacité d'explicabilité inédite, puisque les spectres reconstruits peuvent être interprétés en termes de dynamique d'accélération dans le guide d'ondes. L'analyse du plan (A_1, A_2) , correspondant aux amplitudes de champ dans les deux sections du Mobetron, confirme la validité physique des solutions. Cette caractéristique ouvre la voie à des perspectives d'amélioration, telles que l'intégration de contraintes supplémentaires ou l'établissement de corrélations entre spectres de différentes énergies. PESO ne se limite ainsi pas à une optimisation numérique, mais propose un véritable cadre physique pour la reconstruction spectrale, adapté aux linacs compacts UHDR.

Conclusion. PESO constitue une avancée méthodologique significative pour la radiothérapie FLASH par électrons. Cette approche améliore la précision des calculs Monte Carlo, réduit la dépendance à des choix arbitraires de régularisation et garantit la cohérence physique des spectres. Elle surpasse les méthodes classiques dans les cas complexes, tout en conservant une robustesse supérieure face aux erreurs de mesure. L'intégration de PESO dans les procédures de modélisation des faisceaux UHDR pourrait accélérer l'implémentation clinique de la FLASH-RT en renforçant la fiabilité des calculs de dose et en contribuant à sécuriser cette technologie émergente. Des validations expérimentales directes, telles que la spectrométrie magnétique, permettront de confirmer le réalisme des spectres et d'affiner la méthode. Ainsi, PESO se présente comme un outil stratégique pour relever l'un des principaux défis de la radiothérapie FLASH : la caractérisation précise et reproductible des faisceaux d'électrons ultra-haut débit.

FIGURES

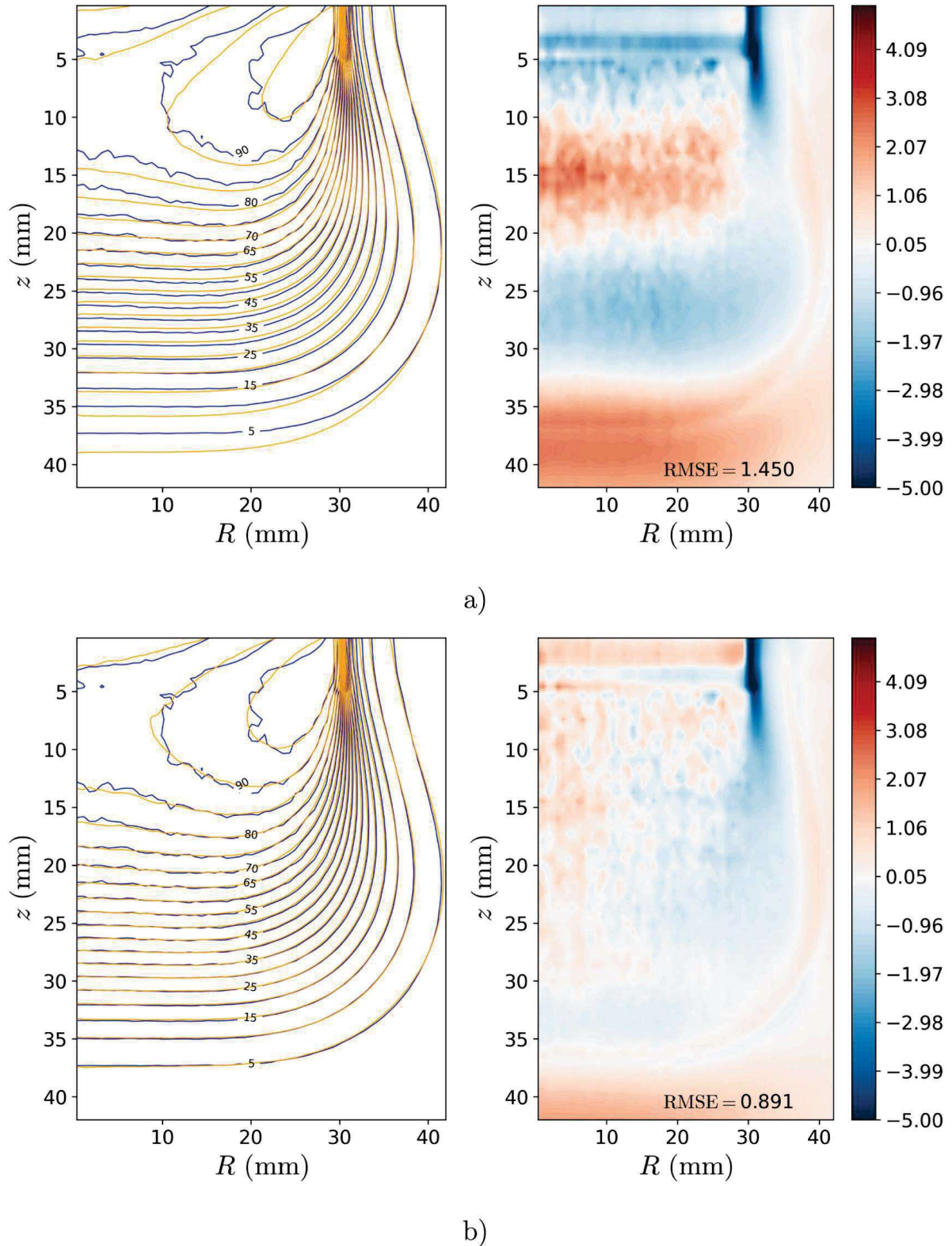


Figure 1 : Reconstruction des isodoses avec la méthode GR (a) et la méthode PESO (b) pour l'applicateur de 60 mm et le faisceau 6 UHDR. À gauche, la mesure (bleu) et la reconstruction (orange). À droite, la différence entre la mesure et la reconstruction en points de pourcentage (pp). Le RMSE est calculé en utilisant tous les points.

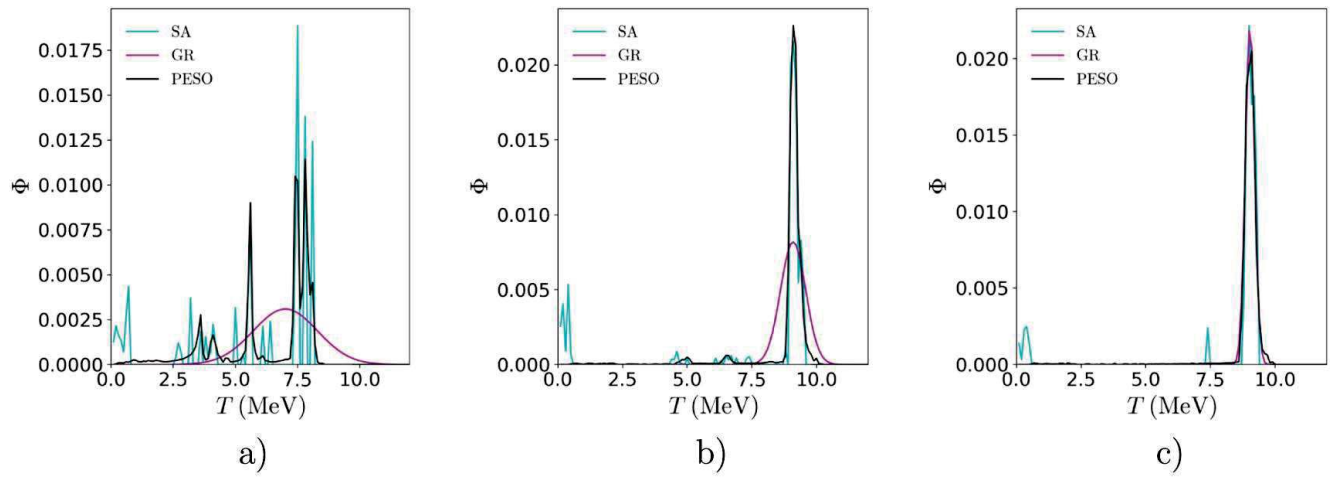


Figure 2 : Spectres reconstruits pour les faisceaux de 6 MeV (UHDR) (a), 9 MeV (UHDR) (b) et 9 MeV (conv) (c) en utilisant les trois méthodes de reconstruction. Les spectres sont optimisés simultanément pour les applicateurs de 25 mm, 40 mm et 60 mm.