

Méthodes et Applications Médicales dans CLEAR, the CERN Linear Electron Accelerator for Research



P. Korysko*,
au nom de l'équipe de CLEAR.

Les Journées Accélérateurs de la Société Française de Physique
5 octobre 2023



*pierre.korysko@cern.ch

Plan

- La ligne de faisceau de CLEAR: Historique & Paramètres.
- Les nouveaux outils développés en 2022/2023.
- Aperçu des expériences effectuées en 2022/2023.
- Conclusions.

La ligne de faisceau de CLEAR: Historique & Paramètres.



Objectifs scientifiques et stratégiques de CLEAR

Objectifs scientifiques et stratégiques:

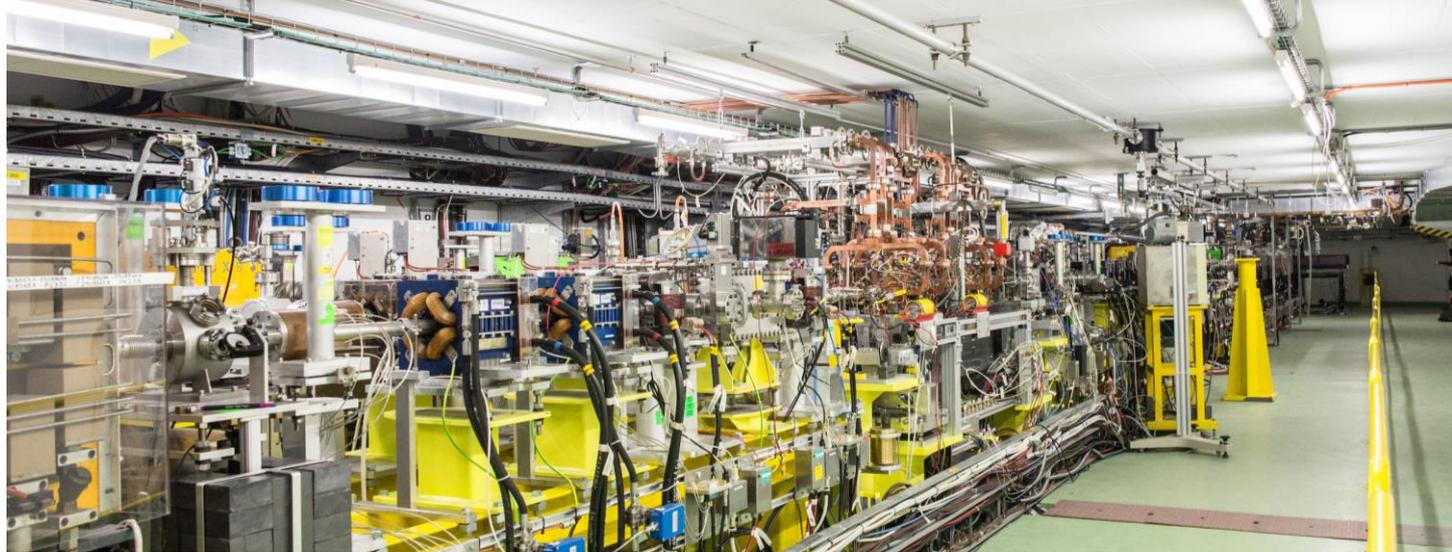
- Offrir une installation d'essai au CERN avec **un haut taux de disponibilité, facile d'accès** et avec des **faisceaux d'électrons de haute qualité**.
- Effectuer de la **R&D** sur des **composants d'accélérateur**, comme tester des **prototypes** pour **l'instrumentation faisceau** et la **technologie de haut gradient RF**.
- Offrir une **installation d'irradiations** avec des électrons à très haute énergie, principalement pour des **applications médicales** et pour tester des **composants électroniques** notamment avec l'Agence Spatiale Européenne.
- Effectuer de la **R&D** sur des **nouvelles techniques d'accélération** – plasma piloté par des électrons et accélération THz.
- Maintenir une **expertise pour les accélérateurs d'électrons** en lien avec les futurs collisionneurs de particules pour le CERN et l'Europe.
- Utiliser CLEAR comme **centre de formation** pour les prochaines générations de chercheurs et ingénieurs dans le domaine des accélérateurs de particules.

**CLEAR est un accélérateur linéaire d'électron polyvalent
et une ligne de faisceau d'essai au CERN.**



CLEAR Timeline

- **Approuvé** en décembre 2016.
- **Début des opérations** en 2017.
- Programme faisceau **flexible**.
 - 8 heures de faisceau par jour.
 - 5 jours par semaine.
- **Indépendant** des autres accélérateurs et arrêts techniques du CERN.
- **2017** → 19 semaines de faisceau.
- **2018** → 36 semaines de faisceau.
- **2019** → 38 semaines de faisceau.
- **2020** → 34 semaines de faisceau (malgré le Covid-19).
- **2021** → 35 semaines de faisceau (malgré le Covid-19).
- **2022** → 37 semaines de faisceau et 27 expériences.
- **2023** → 38 semaines de faisceau et plus de 30 expériences.

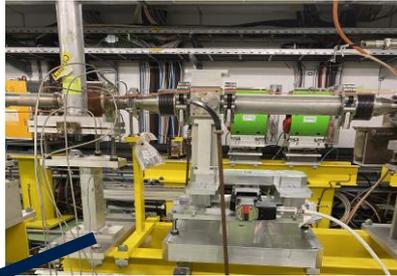


La ligne Faisceau de CLEAR en 2023



Banc d'essai dans l'air

- Etudes diagnostiques
- Irradiation
 - Electroniques
 - VHEE

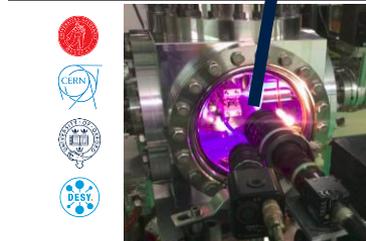
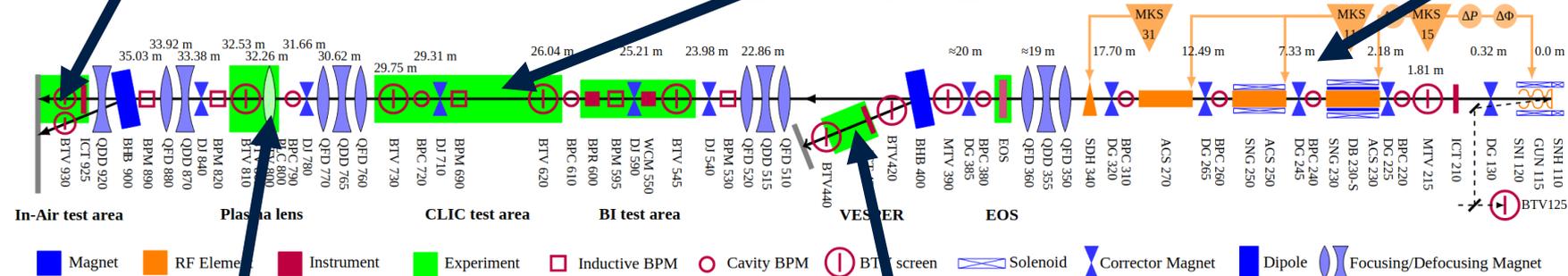


Banc d'essai Instrumentation Faisceau



Injecteur CLEAR

- LINAC Flexible
- 60 – 220 MeV



Lentille Plasma

- Nouvelle focalisation basée sur le plasma

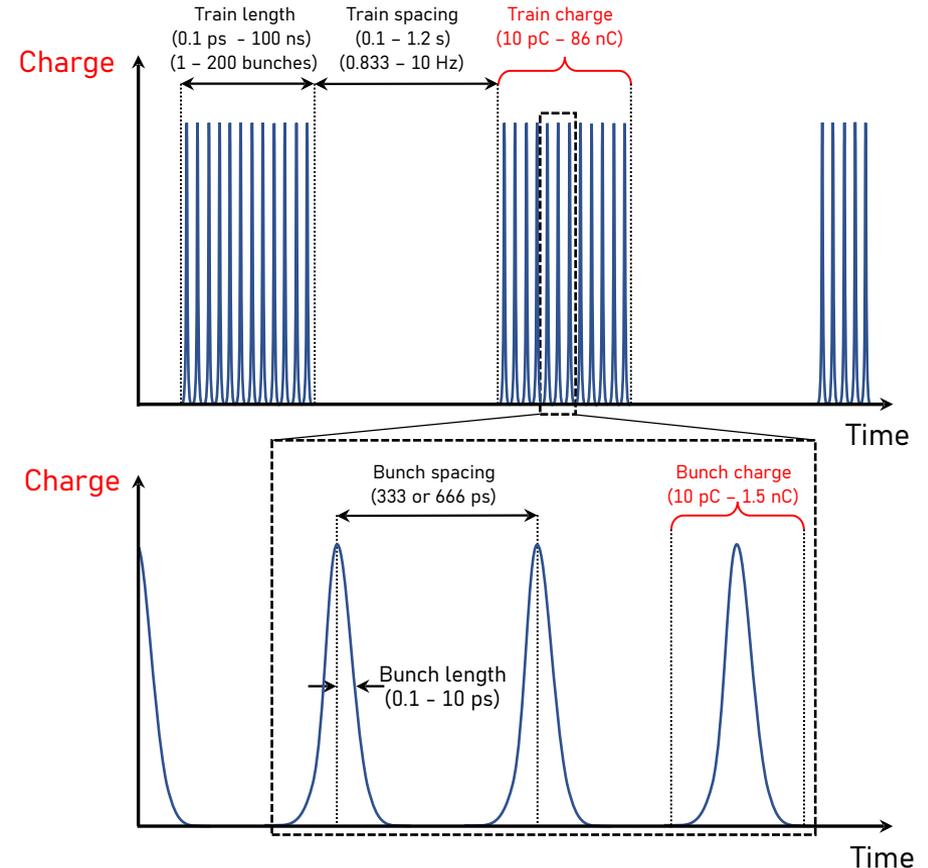


- Installation d'irradiation
 - Sondes spatiales
 - Electroniques
 - VHEE



Paramètres faisceau de CLEAR en 2023

Paramètres	Valeurs
Énergie	60 – 220 MeV
Dispersion en Énergie	< 0.2 % RMS (< 1 MeV FWHM)
Longueur d'un paquet	0.1 – 10 ps RMS
Charge d'un paquet	10 pC – 1.5 nC
Émittance normalisée	3 – 20 μm
Nombre de paquets par train	1 – 200
Charge maximale d'un train	86 nC
Taux de répétition	0.833 – 10 Hz
Espacement des paquets	1.5 et 3.0 GHz



Qu'offre CLEAR à ses utilisateurs?

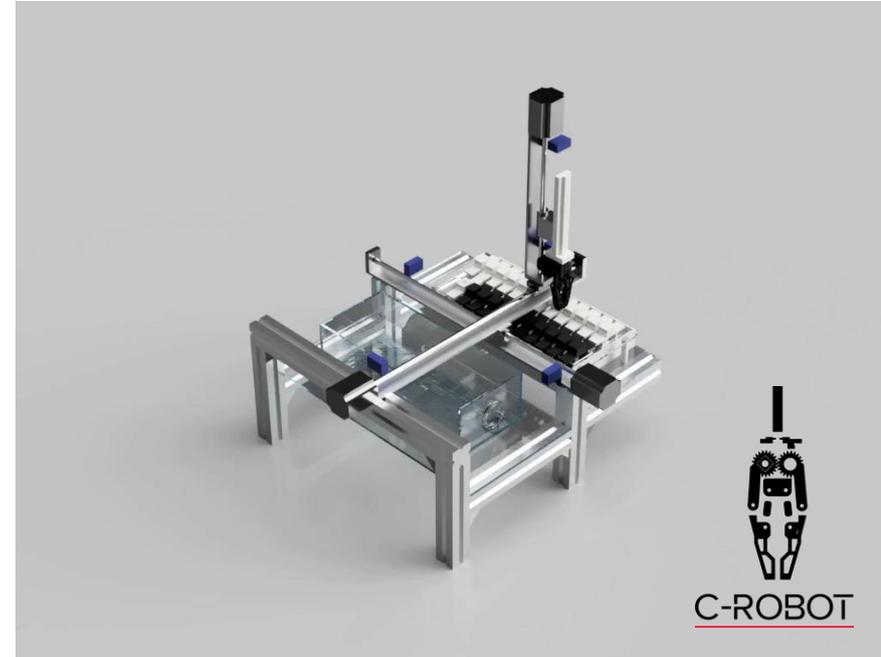
- **Paramètres du faisceau polyvalents** (énergie, taille, dose, charge, longueur, position, etc.).
- Programme de faisceaux **flexible**:
 - 8 à 12 heures par jour (plus si nécessaire).
 - 5 jours par semaine (le week-end, si besoin).
- **Une large gamme de matériel existant disponible** (C-Robot, tables linéaires, écrans YAG, caméras, commandes, etc.).
- **De nombreux outils disponibles** pour concevoir et réaliser les expériences (fraiseuse, meuleuse, perceuses, tours, scies, imprimante 3D, découpeuse laser, etc.).
- **Logiciel adaptatif** pour contrôler à distance le matériel et enregistrer les données mesurées.
- Certains membres de l'équipe de CLEAR peuvent aider les utilisateurs à **développer, concevoir, construire, installer et désinstaller** les composants matériels et logiciels nécessaires à leur expérience.
- **Des experts dédiés** pour délivrer le faisceau demandé et résoudre les problèmes.
- **Un suivi** après l'expérimentation pour **partager, filtrer et comprendre** les données enregistrées.

Outils sélectionnés développés en 2022 : Le C-Robot



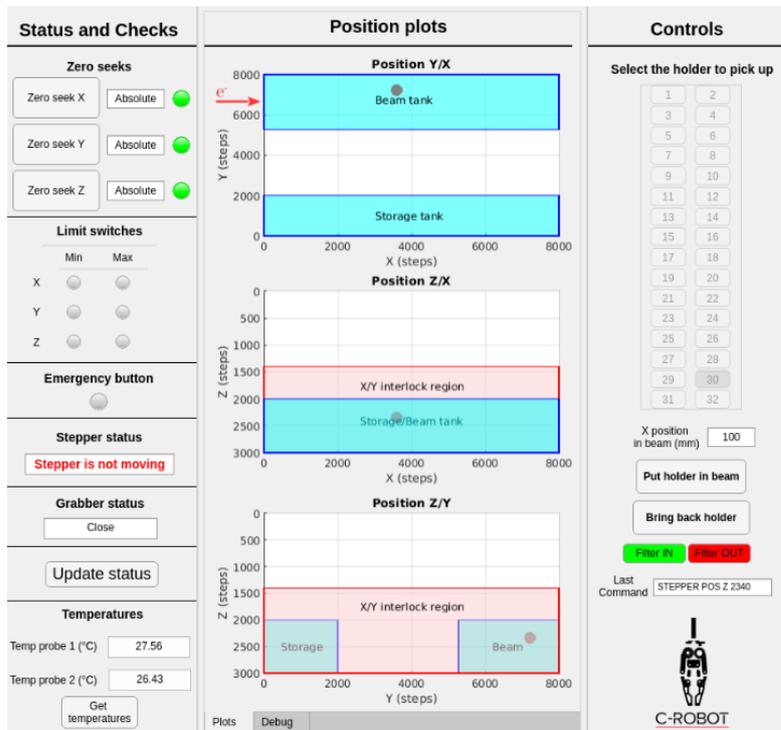
Le C-Robot

- Afin de faciliter le **contrôle précis des échantillons** pour des **irradiations multiples**, le CLEAR-Robot (**C-Robot**) a été conçu et construit par **3 membres de l'équipe de CLEAR**.
- Il se compose de **3 tables linéaires**, de **6 fins de course**, d'une **pince** imprimée en 3D, de **deux réservoirs d'eau** et d'une **carte Arduino**.
- Il a une **précision** en position dans les 3 axes de **50 μ m**.
- Il est entièrement **contrôlable à distance** depuis le réseau technique du CERN.
- Grâce à une **caméra embarquée**, il peut également **mesurer les tailles des faisceaux** et les **positions transversales** dans **l'air ou l'eau** avant d'effectuer les irradiations.
- Il s'agit d'un **projet open source** : des **images**, des **rendus 3D**, des **dessins** et tous les **codes de l'Arduino** et du **GUI** peuvent être trouvés sur : <https://pkorysko.web.cern.ch/C-Robot.html>

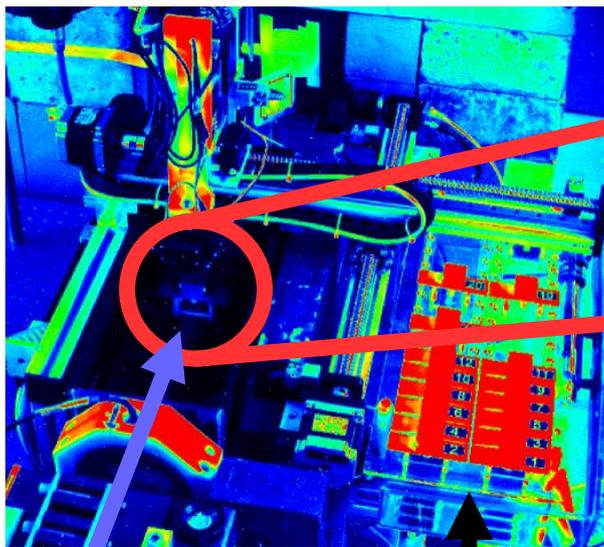


Que peut faire le C-Robot ?

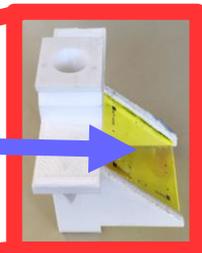
Interface utilisateur graphique



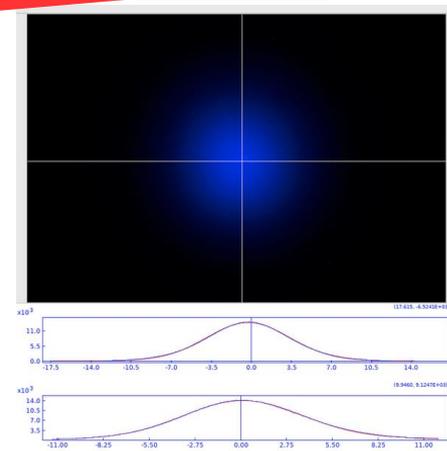
Configuration d'expérience avec faisceau



Caméra

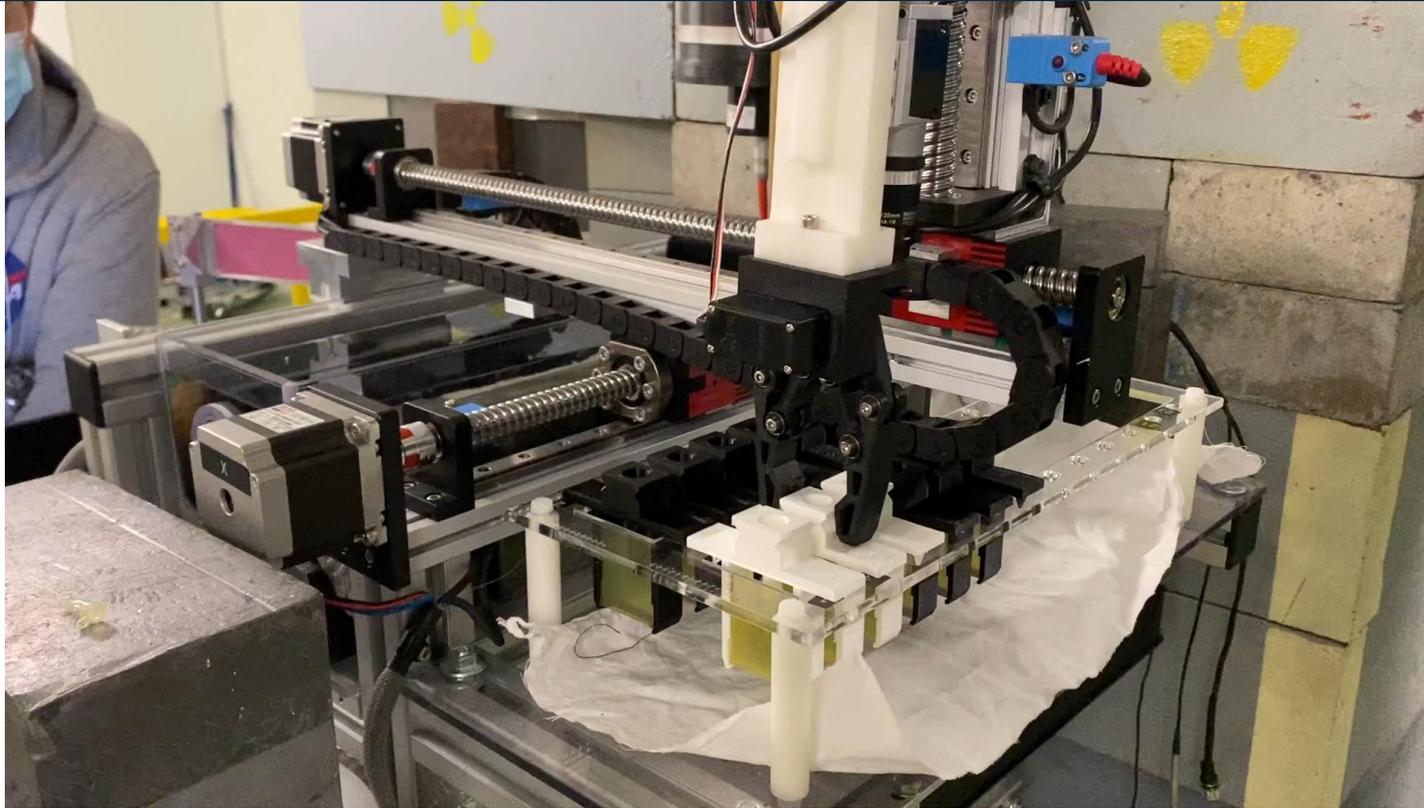


écran YAG



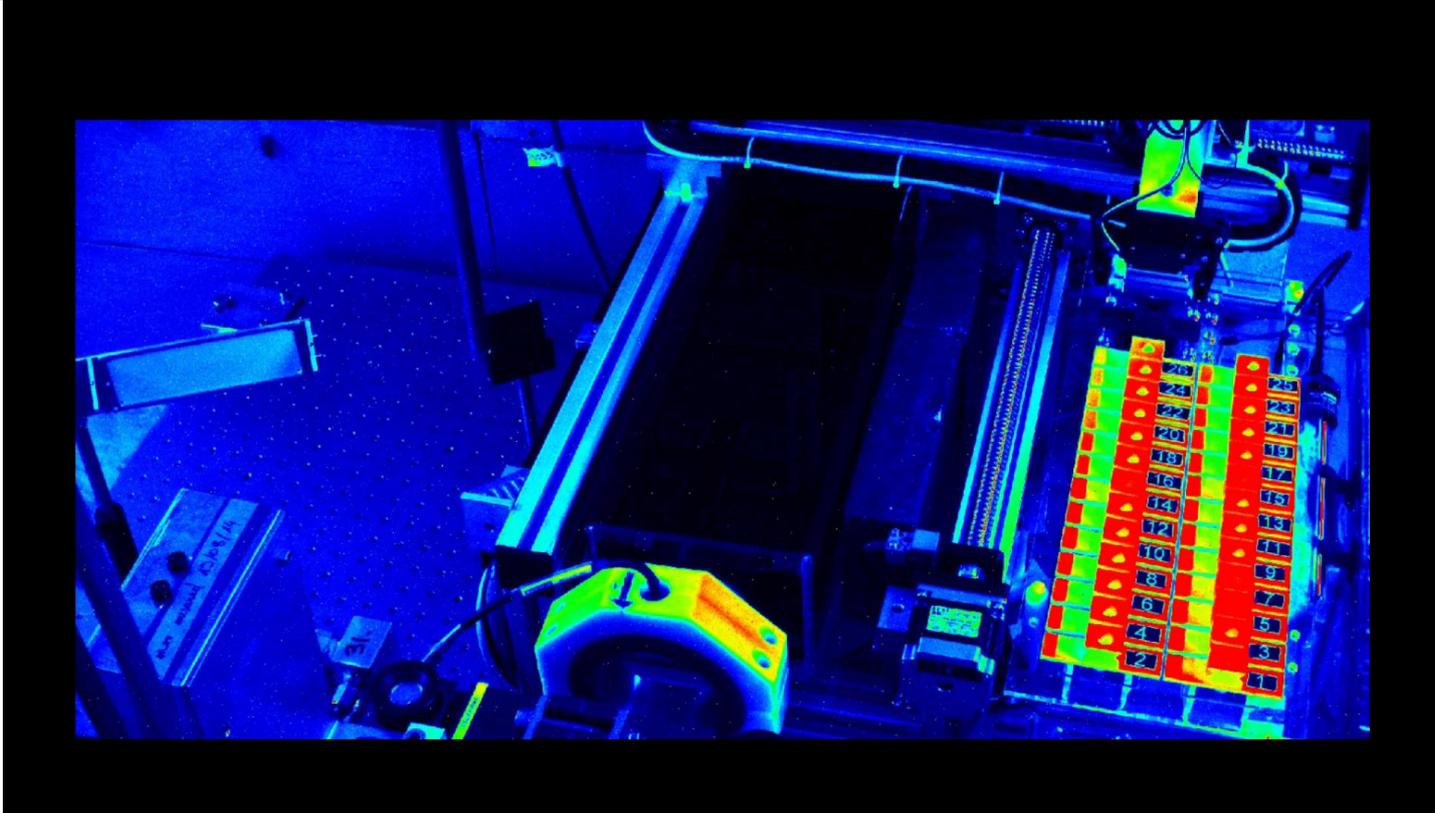
Oeufs de poisson zèbre dans de l'eau chauffée, en attente d'être irradiés

Le C-Robot en action dans CLEAR



[Lien vers la vidéo](#)

Le C-Robot en action avec le faisceau



[Lien vers la vidéo](#)

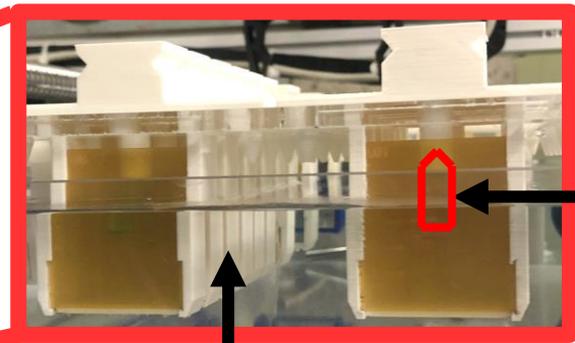
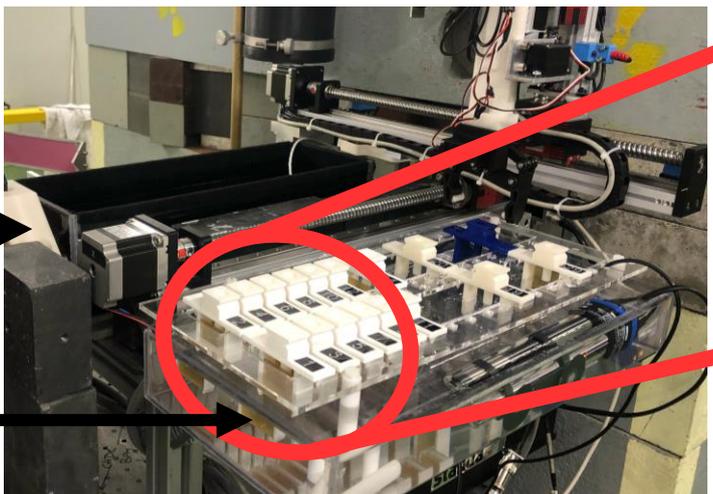
Expériences sélectionnées réalisées en 2022/2023



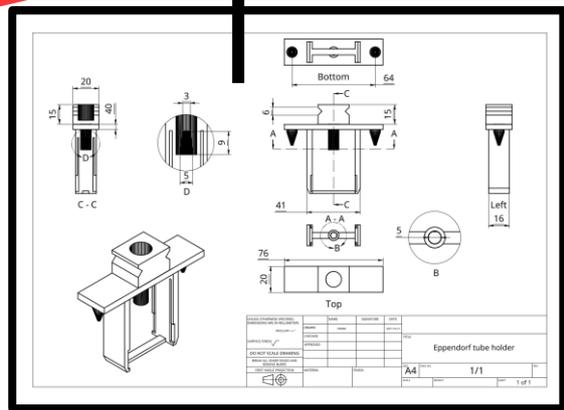
Configuration expérimentale et dosimétrie pour le VHEE lors des irradiations UHDR

Réservoir d'eau pour le faisceau

Réservoir d'eau chauffée de stockage



Tube Eppendorf avec l'échantillon à irradier



Support imprimé en 3D avec 2 films : un avant et un après l'échantillon

Films radiochromiques **découpés au laser** pour mesurer la dose délivrée

Plage de doses : 1 – 100 Gy



Avant irradiation



Après irradiation

V. Rieker & J. Bateman

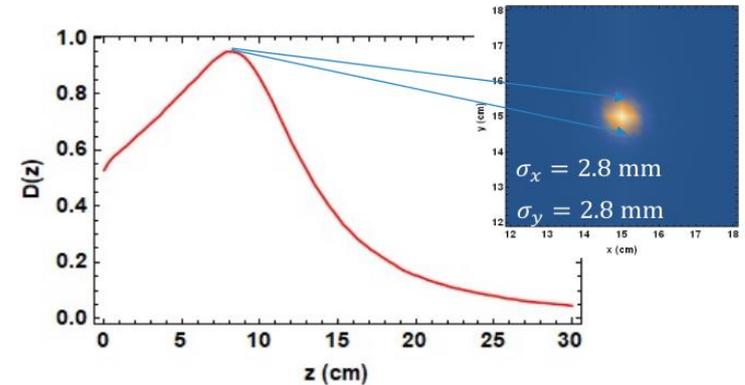
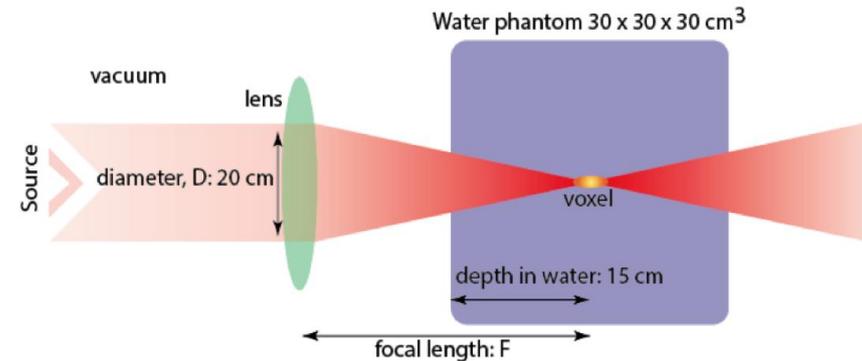
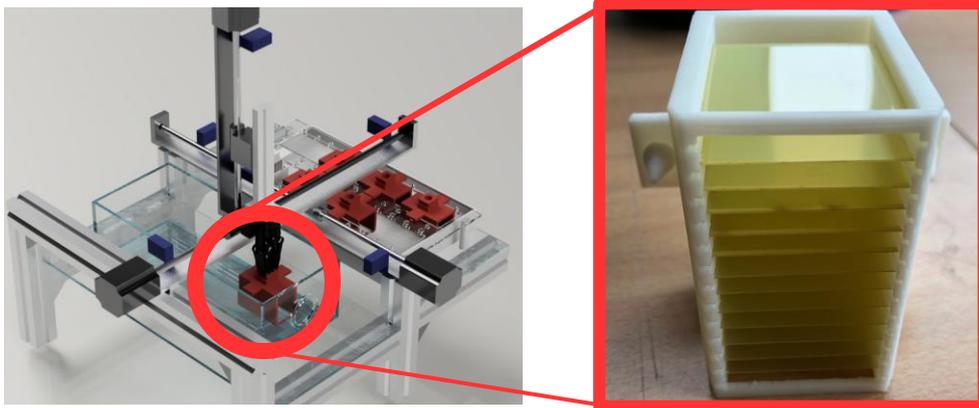
VHEE avec Forte Focalisation

Objectif :

Focaliser le faisceau sur la tumeur afin de minimiser les dommages sur les tissus sains avoisinants.

Expérience :

Mesurer les tailles de faisceaux sur un écran YAG dans le fantôme d'eau (bon modèle du corps humain) et effectuer des irradiations sur de longs supports de films de placés à différentes positions longitudinales.



L. Whitmore

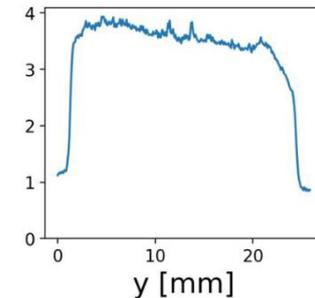
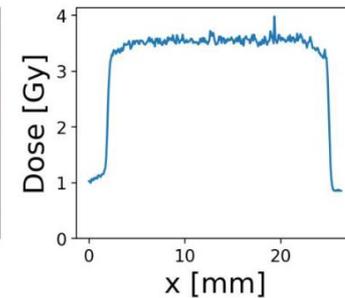
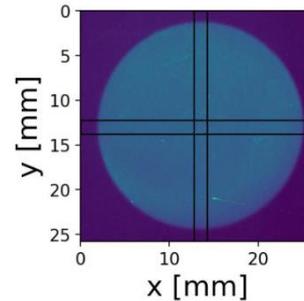
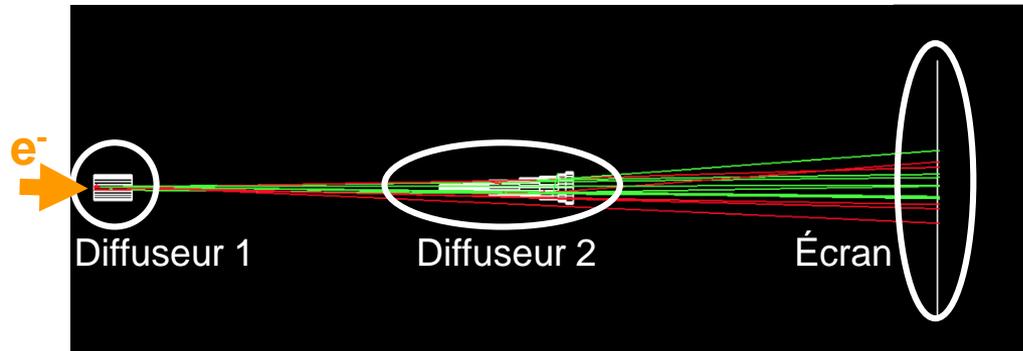
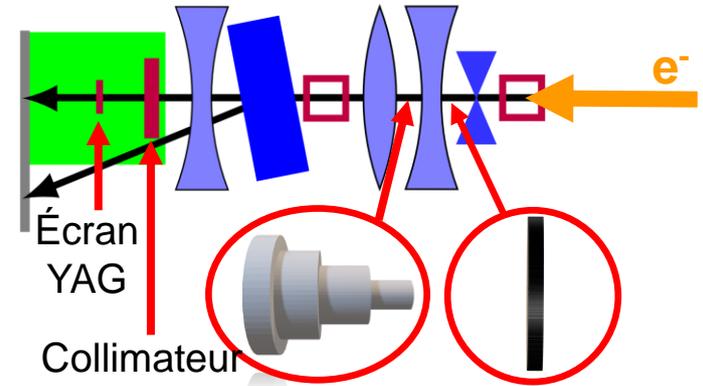
Diffuseur VHEE

Objectif :

Obtenir un faisceau plat ayant une distribution transversale constante au niveau de la tumeur du patient afin de minimiser les dommages sur les tissus sains voisins.

Expérience :

Mesurer les profils, les tailles et l'intensité du faisceau sur un écran YAG et des films après avoir soigneusement inséré deux diffuseurs dans le faisceau avec le C-Robot.



Profils X et Y du faisceau

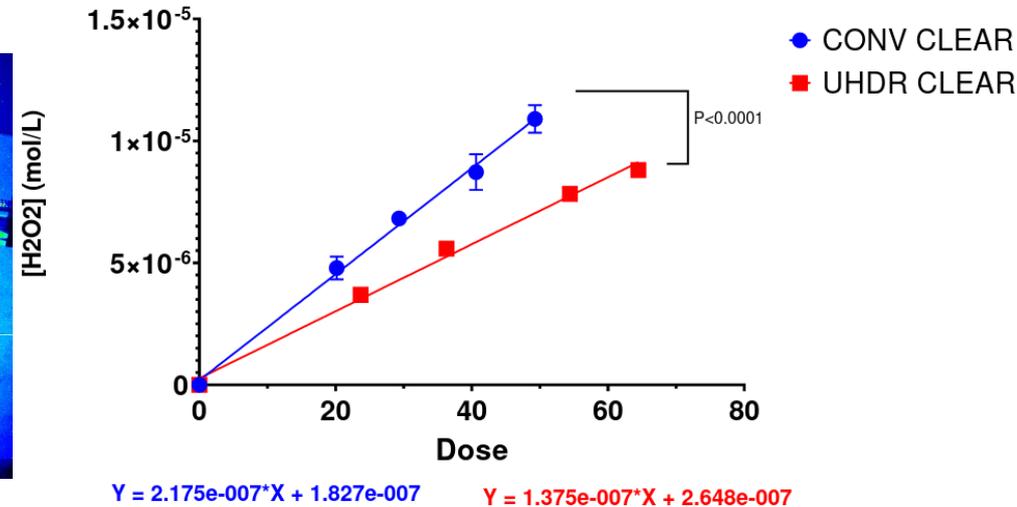
C. Robertson

Objectif :

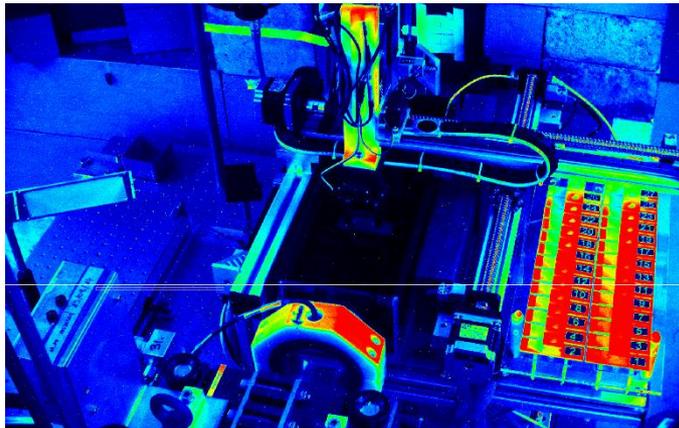
Mesurer et comparer la production d'espèces réactives de l'oxygène dans l'eau à un débit de dose conventionnel et à un débit de dose ultra élevé.

UHDR=1.2 10⁹ Gy/s CONV=0.15-0.41 Gy/s

2022.03.22_ExpH2O2_21%O2_CLEAR_Run1&2



Support avec films et tube Eppendorf



Vue du C-Robot lors d'irradiations pour des études de chimie

H. Kacem, M-C. Vozenin

Irradiation de Plasmides VHEE

Objectif :

Mesurer l'efficacité biologique relative du VHEE et déterminez l'ampleur des dommages à l'ADN créés à des énergies électroniques plus élevées.

Expérience :

Irradier les plasmides avec trois concentrations de piègeurs de radicaux à des énergies de faisceau de 100 à 220 MeV et aux CDR et UHDR.

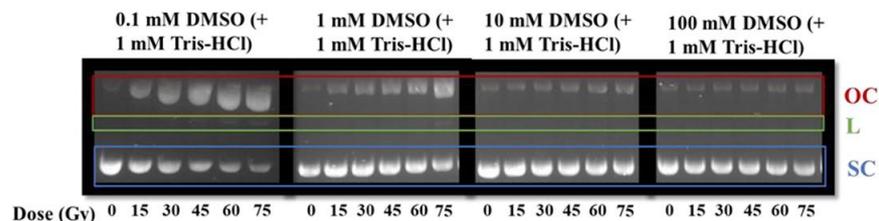
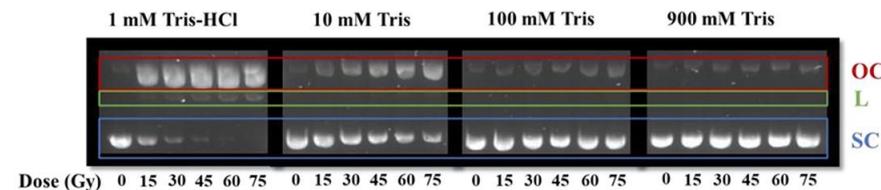
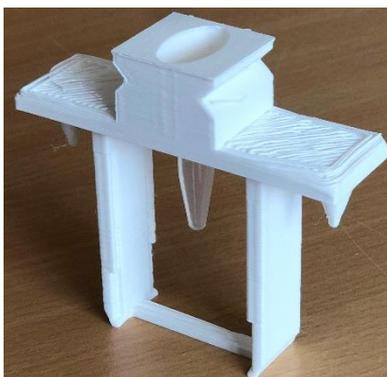


Image de gels d'agarose d'échantillons irradiés aux rayons X où les bandes sur le gel représentent l'ADN plasmidique pBR322.

H. Wanstall

Dosimétrie par scintillateur

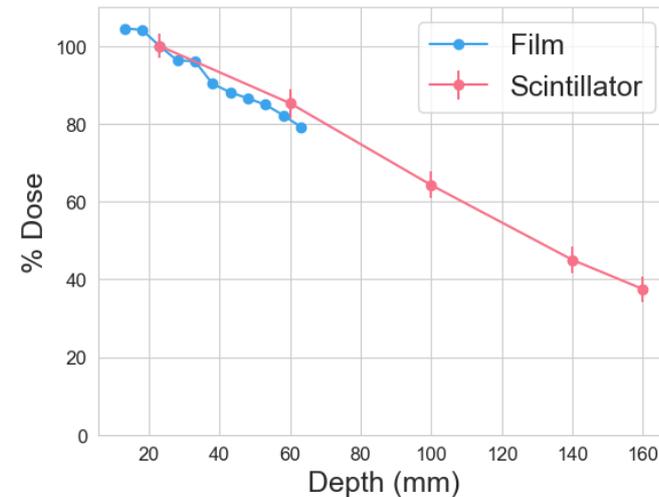
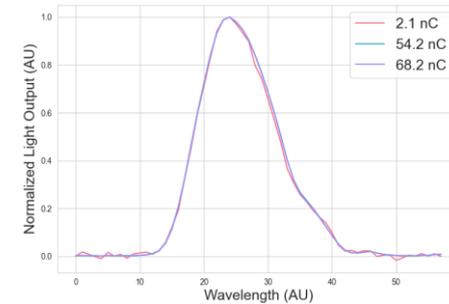
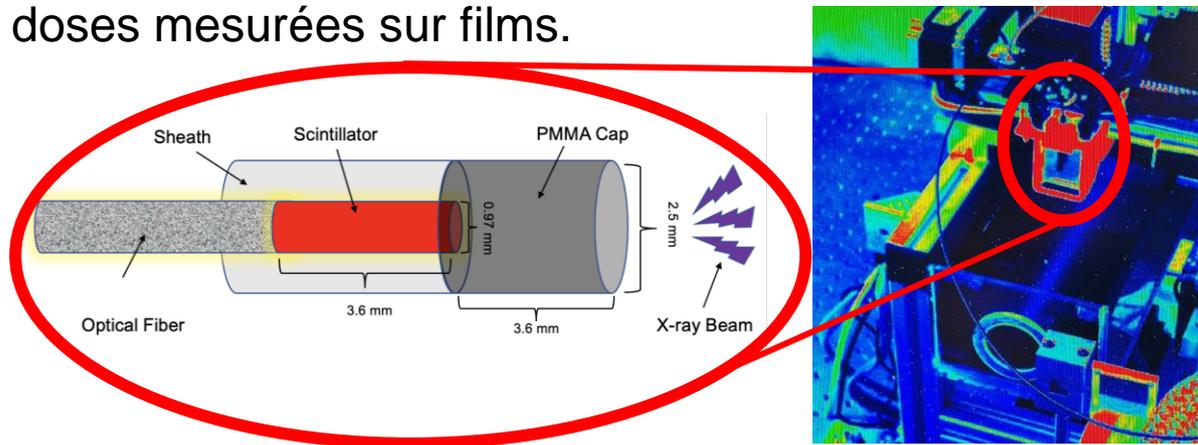


Objectif :

Mesurer la dose à très haut débit avec une lecture en temps réel et une haute résolution spatiale grâce à un scintillateur et une fibre optique.

Expérience :

Mesurer les réponses du scintillateur pour différentes doses et profondeurs d'eau et les comparer avec les doses mesurées sur films.



A. Hart & C. Giguère

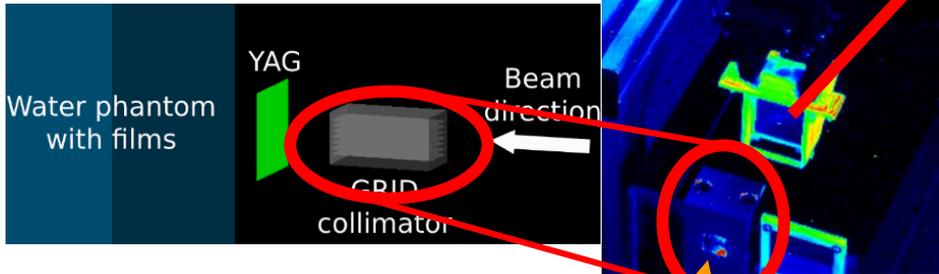
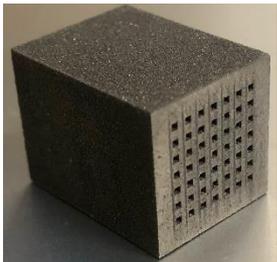
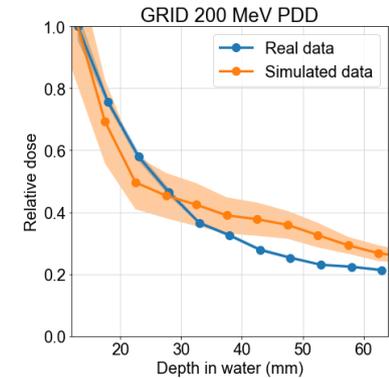
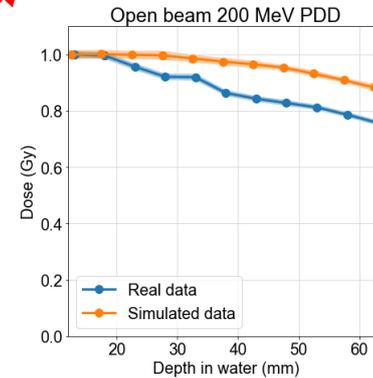
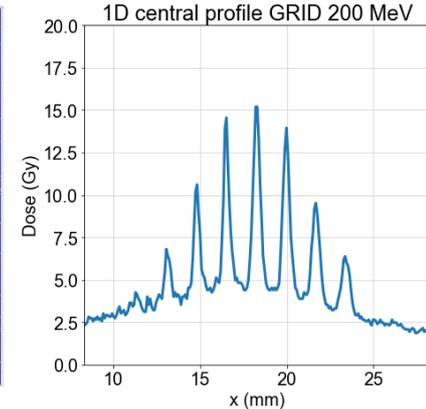
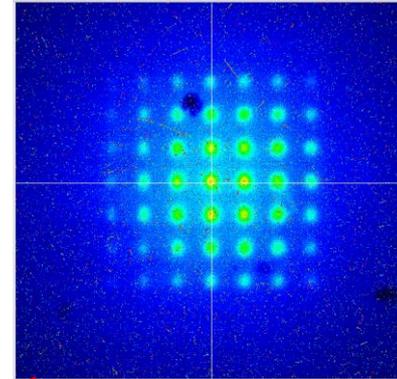
VHEE Collimateur grille

Objectif :

Étudier la dose délivrée à l'aide d'un collimateur grille (RT spatialement fractionnée, connue pour épargner les tissus sains).

Expérience:

Comparer les valeurs et profils de dose avec et sans le collimateur grille inséré pour différentes profondeurs d'eau, avec l'écran YAG et les films.



e^-

N. Clements, N. Esplen & A. Hart

Base de données des expériences de CLEAR



CLEAR EXPERIMENTS



Show 100 entries

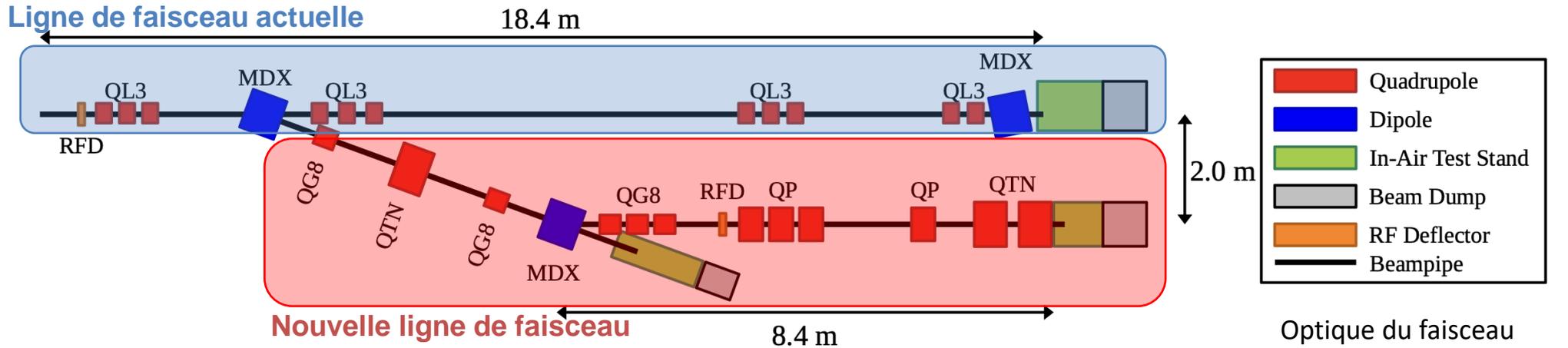
Search:

Date	Experiment	Main contact	Institutes	Beam Time Request	Pictures	Experiment Review	Presentations	Publications
2022-05	AWAKE Cherenkov Diffraction Radiation BPM	Collette Pakuza	CERN					
2022-04	R2E FLASH+EDI	Andrea Coronetti	CERN					
2022-10	CChDR sampling by KAPTEOS electro optical probes	Andreas Schloegelhofer	CERN					
2022-05	VHEE Scatterers	Cameron Robertson	University of Oxford					
2022-04	VHEE Detectors	Joseph Bateman	University of Oxford					
2021-05	Study of coherent ChDR emitted by short bunch	Thibaut Lefevre	CERN / RHUL / Toms University					
2021-03	CLIC WFM/kick	Kyrre Ness Sjobak	University of Oslo / CERN					
2021-03	High frequency beam position monitor (BPM) for the AWAKE experiment	Eugenio Sines	CERN					

Liste de toutes les expériences réalisées à CLEAR:

https://pkorysko.web.cern.ch/CLEAR/Table/CLEAR_experiments.html

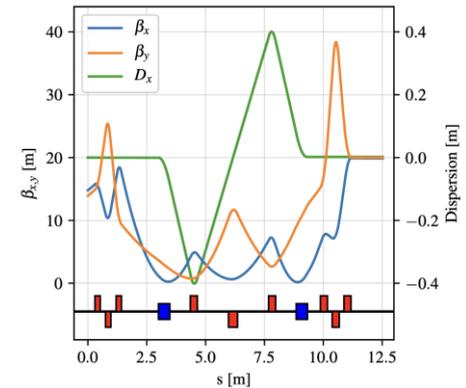
Nouvelle ligne faisceau en 2024



Nouvelle ligne faisceau:

- Un (ou deux) bancs d'essais dans l'air.
- Dédié aux irradiations et aux applications médicales.
- Ligne de faisceau avec optique flexible pour augmenter la gamme de paramètres du faisceau (charge, taille, dose, etc.).
- Nouveau robot (C-Robot 2.0) installé sur le banc d'essai final dans l'air.

Optique du faisceau



CLEAR dans la presse en 2022

F / Sciences

Le futur de la radiothérapie s'écrit au Cern à Genève

Par **Pauline Fréour**

Publié le 06/11/2022 à 18:28, mis à jour le 06/11/2022 à 18:28



Située sur le campus du Cern, l'installation Clear est une technologie de pointe au service de l'innovation scientifique et médicale. 2020-2022 CERN

PHYS ORG — JAPANTODAY

OCTOBER 22, 2022

Particle physics pushing cancer treatment boundaries

by Nina LARSON



Facility coordinator Roberto Corsini shows off a 40-metre linear particle accelerator at CER...

NATIONAL GEOGRAPHIC



A cancer patient receives radiation therapy in at the Auguste Victoria Hospital in East Jerusalem, Israel. While radiotherapy is an effective way to fight cancer, current technologies cannot reach tumors deep inside the body. Physicists are hoping to change that.

PHOTOGRAPH BY CORINNA KERN, LAIF/REDUX

SCIENCE

How do you kill hard-to-reach tumors? Particle physics is on the case.

Une expérience à CLEAR ?

Vous avez une expérience en tête et vous souhaitez la tester dans un accélérateur d'électrons linéaire ?

Retrouvez plus d'informations sur notre site Internet : <https://clear.cern/>
Et remplissez notre [Formulaire de Demande de Faisceau](#) !



Experiment Request Form

A. REQUESTER DETAILS

Principal Investigator: _____ Your name

Institution: _____ Your institution

Contact Information (phone/email): _____ john.doe@email.ru

Experiment Members: _____ Your team

Collaborating Institutions: _____ Collaborating Institutions

Funding Source (optional) _____

Approximate Duration: _____ Your duration

B. EXPERIMENT DESCRIPTION

1. Scientific justification (one paragraph)

Amazing experiment.

2. Experiment short description and goals (max 1 page)

Amazing goals.

C. BEAM PARAMETERS

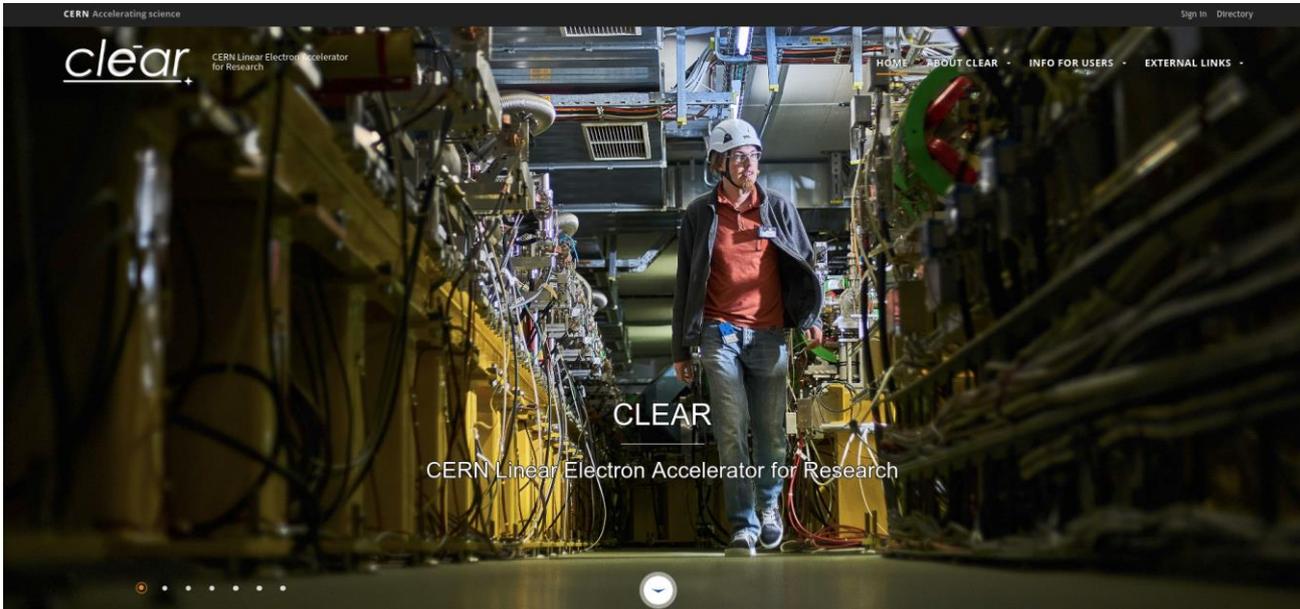
Please provide as much detail as possible. Provide ranges if you have the necessity to vary some of the parameter during your experiment.

Bunch charge / length: _____

Number of bunches / time structure: _____

Beam energy / energy spread: _____

Transverse Twiss parameters (β ; α ; ϵ)
or beam size/shape: _____



Conclusions

- **Très bonne année 2022 à CLEAR et année 2023 est très prometteuse :**
 - **37 semaines** de faisceau en **2022** et **38 semaines** prévues en **2023**.
 - **Les plages de paramètres CLEAR** ont été augmentées (**charge du faisceau, taux de répétition, stabilité, taille du faisceau, etc.**).
 - **27 expériences** (dont **8 pour des applications médicales**) réalisées en **2022** et plus de **30 expériences** (dont au moins **12 pour des applications médicales**) prévues pour **2023**.
 - En **2022**, ces expériences ont donné lieu (pour l'instant) à **18 papiers de colloques, 5 articles de revues, 7 thèses de doctorat** et de **nombreuses présentations** lors de conférences.
 - **Plus de 30 visites** de CLEAR ont été proposées en **2022** pour des **étudiants, artistes, journalistes, entreprises, personnel du CERN...**
- **Nouvelle ligne de faisceau dédiée aux irradiations et aux applications médicales en 2024.**

Merci

