

Equipe (EIA) Instrumentation des Accélérateurs

Orateurs: Elian Bouquerel - Thomas Adam

Journée scientifique et technique IPHC
Lundi 14 oct. 2024

Les accélérateurs en chiffres

+30 000
accélérateurs
de particules

en opération à travers le monde

+5000
emplois en France

en relation avec les accélérateurs
dont environ 2 000 emplois dans une trentaine de sociétés
(grands groupes et PME)

+25 000
patients traités

par hadron thérapie en Europe

>90%
des doctorants

du domaine des accélérateurs
trouvent un emploi directement suite à
leur thèse

des millions
de produits finis

fabriqués, stérilisés ou inspectés
par an, à l'aide d'accélérateurs
industriels dans le monde

1/3 des Prix Nobel
de Physique

récompensés grâce au développement
des accélérateurs de pointe

5 organismes principaux



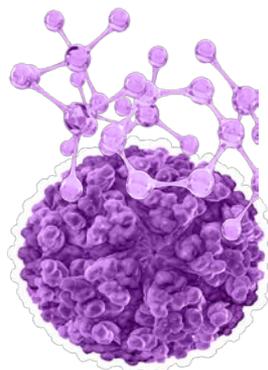
Des instruments pour la science et pour la vie quotidienne

Recherche

Physique (*nucléaire - du solide - de la matière condensée - des particules*),

Biologie, Sources de neutrons, Géophysique, Chimie, Astrophysique...

- Mise en évidence du boson de Higgs au CERN (LHC - Large Hadron Collider)
- Rayonnement synchrotron peut être utilisé comme microscope pour sonder et analyser des matériaux, les cristaux, les semi-conducteurs
- Production de neutrons pour la recherche fondamentale sur les particules élémentaires des hautes énergies
- La lumière synchrotron permet d'élucider la structure 3D des protéines comme celle du virus Chikungunya



Analyse & contrôle des matériaux

- Patrimoine culturel
- Authentification d'œuvres d'art
- Inspection de fret
- Sécurité



Santé & Médecine

- Traitement des cancers
- Production de radio-nucléides pour l'imagerie médicale
- Recherche sur les maladies émergentes
- Recherche sur la résistances aux antibiotiques



Industrie

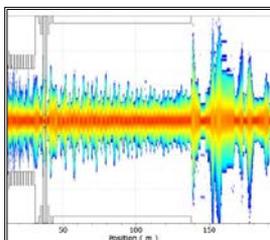
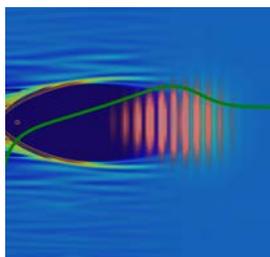
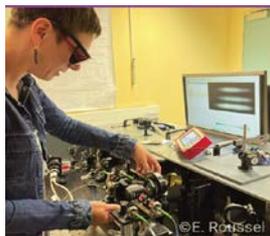
- Implantation d'ions pour l'électronique
- Durcissement de surfaces et de matériaux
- Soudage et découpe
- Traitement de déchets et de matériel médical
- Stérilisation



Les domaines des accélérateurs

Physique des faisceaux

- Electro-magnétisme
- Plasmas
- Mesures physiques
- Interaction rayonnement matière
- Simulation et calcul
- Optique
- Laser
- Instrumentation
- Dynamique de faisceau
- Physique non linéaire



Domaines technologiques

- Machine learning
- Informatique
- Technologie du vide
- Mécanique de précision
- Big Data
- Electronique
- Radio-fréquence
- Cryogénie
- Traitement de données
- Contrôle-Commande
- Supraconductivité

Quatre grands complexes d'accélérateurs en France



GANIL (Caen)

©GANIL_DRAKODRONE - Olivier Navas

Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
(depuis 1976)

Dédié à la recherche et aux applications industrielles utilisant des faisceaux d'ions (SPIRAL2 : accélération H⁺ (33 MeV, 165 kW), D⁺ (40 MV, 200 kW), 5 cyclotrons, 5000 heures de faisceau par an...)

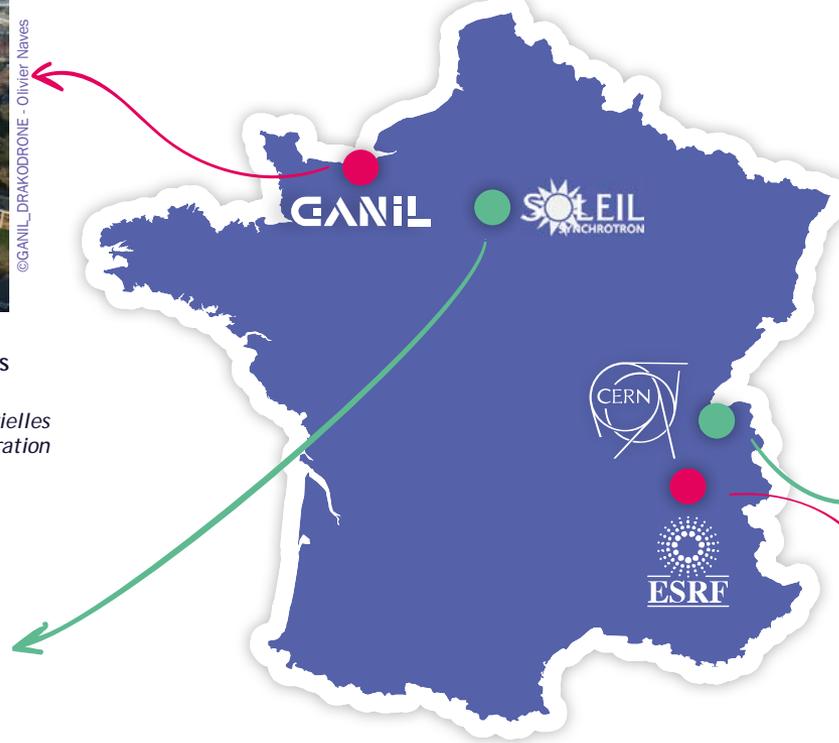


SOLEIL (Saint-Aubin)

©Soleil

Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE/Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique (depuis 2006)

Synchrotron de 3e génération, Linac 100 MeV, Booster 3 Hz, - Anneau de stockage 2,75 GeV, circonférence 354 m, 29 lignes de lumière...



CERN (Meyrin-Prévessin)

©CERN

Organisation européenne pour la recherche nucléaire (depuis 1954)

4 accélérateurs principaux, Linac 4, PS Booster, Proton Synchrotron, Super Proton Synchrotron...; LHC : Large Hadron Collider 6,8 TeV, circonférence 27 km ; 4 grands détecteurs: ALICE, ATLAS, CMS et LHCb + Autres machines...



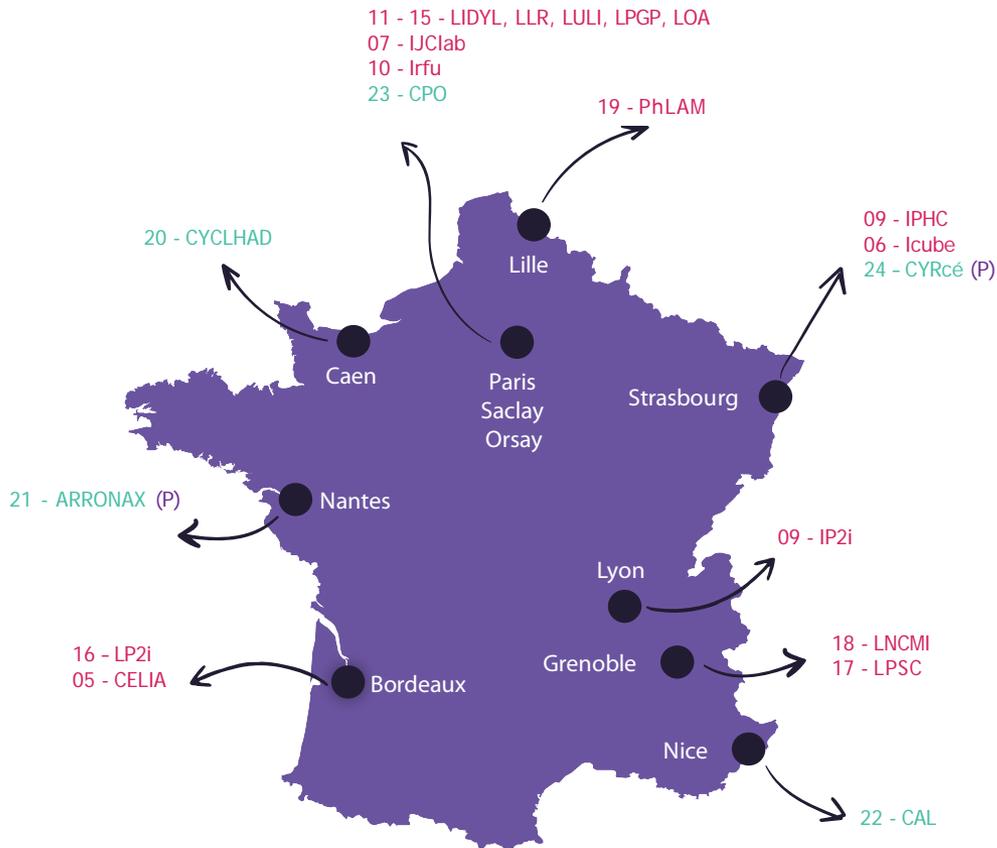
ESRF (Grenoble)

©ESRF

European Synchrotron Radiation Facility - Installation européenne de rayonnement synchrotron (depuis 1989)

Linac 200 MeV, Anneau de stockage 6 GeV, Circonférence 844 m

Une recherche française riche et variée



Laboratoire / Instituts
Santé
(P) Plateformes

Laboratoires / Instituts

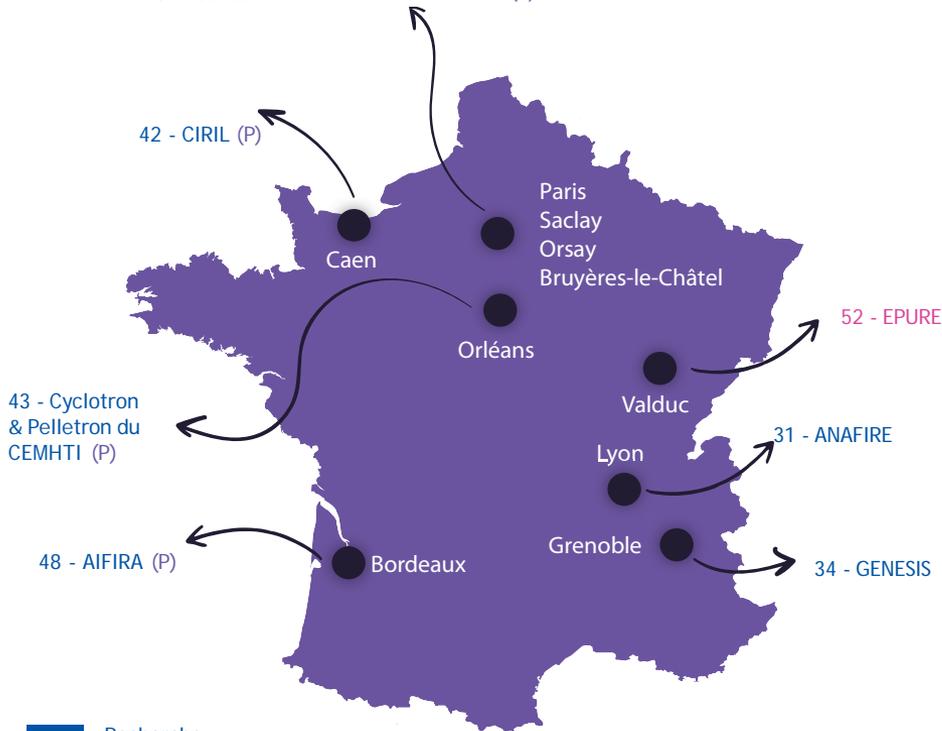
- 5. - **CELIA** (UMR CNRS/Uni. Bordeaux) Centre Lasers Intenses et Applications
- 6. - **ICube** (UMR CNRS/Uni. Strasbourg) Laboratoire des sciences de l'ingénieur, de l'informatique et de l'imagerie
- 7. - **IJCLab** (UMR CRNS/Uni. Paris-Saclay) Laboratoire de physique des deux infinis Irène Joliot-Curie
- 8. - **IP2i** (UMR CNRS/Uni. Lyon) Institut de Physique des Deux Infinis
- 9. - **IPHC** (UMR CNRS/Uni. Strasbourg) Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien
- 10 - **Irfu** (CEA-Saclay) Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers
- 11 - **LIDYL** (CEA-Saclay) Laboratoire Interactions, Dynamiques et Lasers
- 12 - **LLR** (UMR CNRS/Ecole Polytechnique Paris) Laboratoire Leprince-Ringuet
- 13 - **LULI** (UMR CNRS/Ecole Polytechnique -CEA-Uni. Sorbonne) Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses
- 14 - **LPGP** (CNRS/Orsay) Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas
- 15 - **LOA** (UMR CNRS/Ecole Polytechnique -ENSTA Paris) Laboratoire d'Optique Appliquée
- 16 - **LP2i** (UMR CNRS/Uni. Bordeaux) Laboratoire de Physique des Deux infinis
- 17 - **LPSC** (UMR CNRS/Uni. Grenoble) Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie
- 18 - **LNCMI** (CNRS/Grenoble) Laboratoire National des Champs Magnétiques Intenses
- 19 - **PhLAM** (CNRS/Lille) Laboratoire de Physique des Lasers, Atomes et Molécules

Accélérateurs pour la santé

- 20 - **CYCLHAD** (Caen) Centre d'hadronthérapie - Cyclotron
- 21 - **ARRONAX (P)** (Nantes) Cyclotron haute intensité C70
- 22 - **CAL** (Nice) Centre de protonthérapie - Centre Antoine Lacassagne
- 23 - **CPO** (Orsay) Centre de protonthérapie - Institut Curie
- 24 - **CYRcé (P)** (Strasbourg) CYclotron pour la RecherChe et l'enseignement

Une recherche française riche et variée

- 30 - ALTO (P)
- 32 - CLIO
- 33 - ELYSE (P)
- 35 - JANNuS (P)
- 36 - PHIL
- 37 - SCALP
- 38 - ThomX
- 50 - ELSA
- 51 - NENUPHAR
- 39 - APOLLON
- 40 - ALIENOR (P)
- 41 - Andromède (P)
- 44 - Micronsonde LEEL (P)
- 45 - SAFIR (P)
- 46 - HVEM (P)
- 47 - SIRIUS (P)
- 53 - New AGLAE



- Recherche
- Défense
- Patrimoine culturel
- (P) Plateformes

Le patrimoine

53 - New AGLAE (C2RMF - Musée du Louvre) Etude d'œuvres d'art et archéologie

Accélérateurs pour la recherche

- 30 - ALTO (P) (Orsay) Linac électron 50 MeV pour la physique nucléaire
- 31 - ANAFIRE (Lyon) Analyses et Faisceaux d'Ions pour la Radiobiologie et l'Environnement
- 32 - CLIO (Orsay) Laser à électrons libres
- 33 - ELYSE (Orsay) Accélérateur d'électrons picoseconde
- 34 - GENESIS (Grenoble) LPSC - Générateur neutrons
- 35 - JANNuS (Orsay-Saclay) Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation
- 36 - PHIL (Orsay) Banc de test photo-injecteur pour R&D
- 37 - SCALP (Orsay) Synthèse et Caractérisation par des ions Accélérés pour la recherche Pluridisciplinaire
- 38 - ThomX (Orsay) Source X Compton - Accélérateur et circulateur
- 39 - APOLLON (Saclay) Impulsions laser 10 PW pour l'étude d'accélération d'électrons
- 40 - ALIENOR (P) (Saclay) Accélérateur Linéaire d'Electrons Nanoseconde pour l'Etude de la Radiolyse
- 41 - Andromède (P) (Orsay) Instrument pour l'analyse par spectrométrie de masse de nano-domaines et nano-objets présents sur une surface
- 42 - CIRIL (P) (Caen) Centre Interdisciplinaire de Recherche avec les Ions Lourds
- 43 - Cyclotron & Pelletron du CEMHTI (P) (Orléans) Laboratoire Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation
- 44 - Micronsonde LEEL (P) (Saclay) Laboratoire d'Étude des Éléments Légers
- 45 - SAFIR (P) (Paris) Système d'Analyse par Faisceaux d'Ions Rapides
- 46 - HVEM (P) (Saclay) Microscope électronique à haute tension
- 47 - SIRIUS (P) (Palaiseau) Plateforme d'irradiation avec des électrons de haute énergie
- 48 - AIFIRA (P) (Bordeaux) Applications Interdisciplinaires de Faisceaux d'Ions en Région Aquitaine

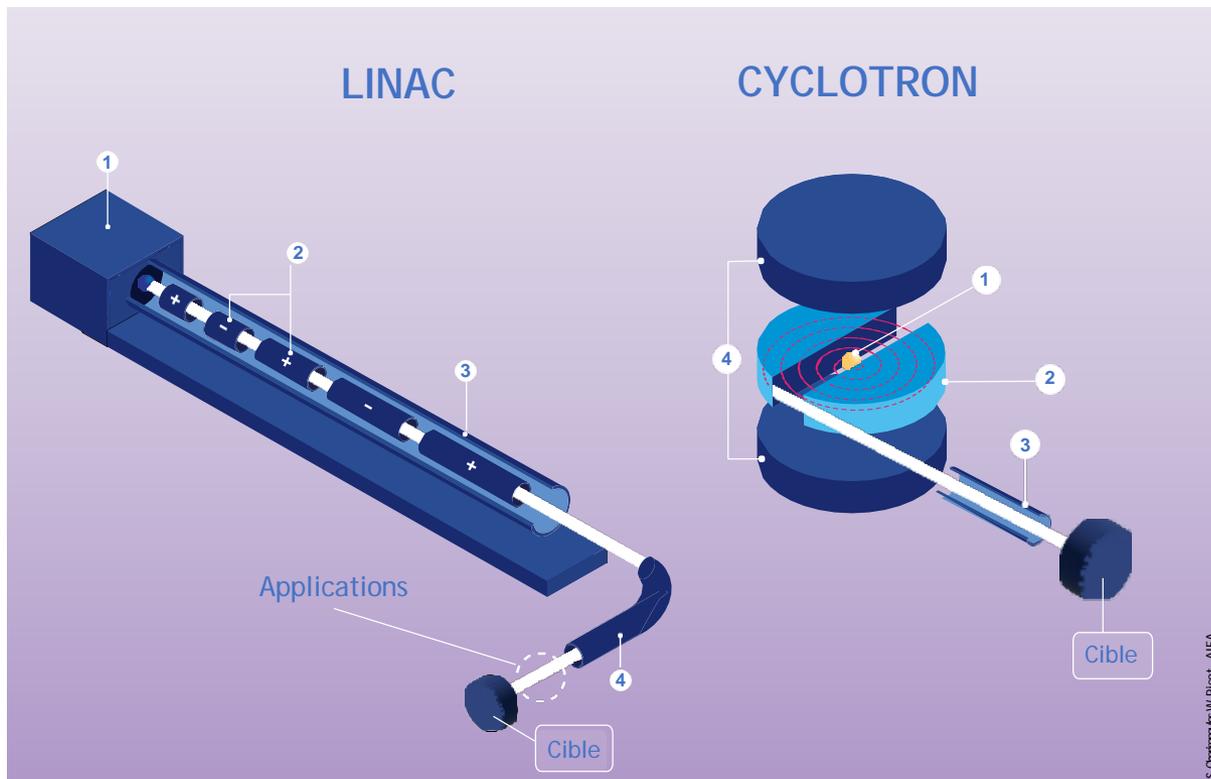
Accélérateurs pour la défense

- 50 - ELSA (CEA-DAM Ile-de-France) Electrons, Lasers, Sources X et Applications. Accélérateur d'électrons 19-30 MeV, source X Bremsstrahlung et Compton Inverse
- 51 - NENUPHAR et 4MV (CEA-DAM Ile-de-France) Accélérateurs électrostatiques (Van de Graaff) pour la physique nucléaire
- 52 - EPURE (CEA DAM Valduc) Accélérateurs Linéaires à Induction pour la radiographie flash X

Composants essentiels d'un accélérateur

Les accélérateurs produisent et accélèrent des faisceaux de particules chargées de la taille d'un atome ou plus petites, telles que les électrons, les protons et les ions.

- 1 **Source:** produit les particules chargées
- 2 **Structure accélératrice** qui augmente l'énergie des particules et les accélère
- 3 **Série de tubes métalliques à vide:** permettent aux particules de se déplacer sans rencontrer d'obstacles (molécules d'air, particules de poussière)
- 4 **Système d'électro-aimants:** concentre les particules du faisceau et les dirige ou modifie leur trajectoire avant de les propulser sur une cible



A ces composants s'ajoutent:

Diagnostics Alimentations Pompes à vide Refroidissement ...
Contrôle-commande Structures mécaniques Sécurité Génie civil

Beaucoup de corps de métiers réunis autour d'un même projet !

Equipe Instrumentation des Accélérateurs à l'IPHC

Equipe créée en 2006 dans le cadre du projet SPIRAL2/GANIL

(Système de Production d'Ions
RAdioactifs en Ligne de 2^e génération)

**Thomas
ADAM**
IE



- Responsable Assemblage, Intégration et Tests
- Ingénierie mécanique
- Fabrication - Montages
- Dispositifs de Vide

**Elian
BOUQUEREL**
IR, PhD



- Management d'équipe
- Système Faisceau
- Système optique

**Philippe
GRAEHLING**
IE



- Automaticien
- Actionneurs Electroniques
- Câblage électronique

**Chaker
MAAZOUZI**
IR, PhD



- Architecture de système d'acquisition de données
- Coordinateur technique diagnostics
- Détecteurs – Diagnostic Faisceau

**Emil
TRAYKOV**
IR, PhD

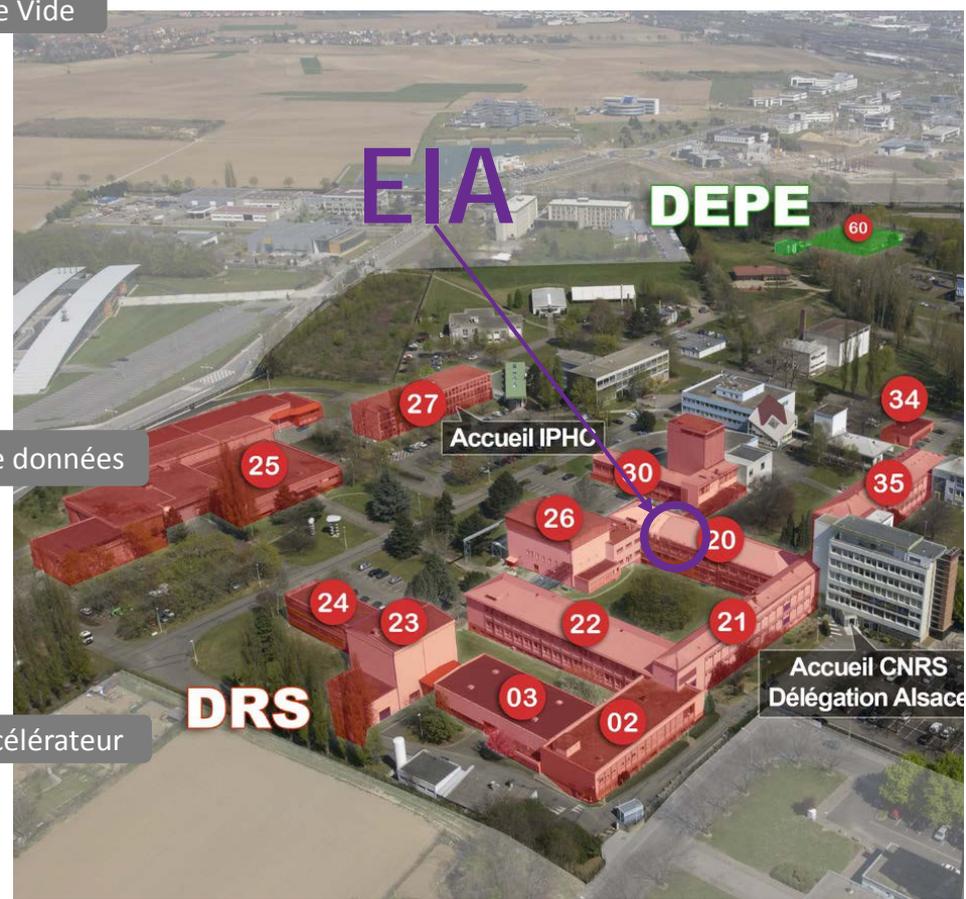


- Système Faisceau
- Détecteurs – Diagnostic Faisceau
- Spectrométrie de masse
- Régleur accélérateur

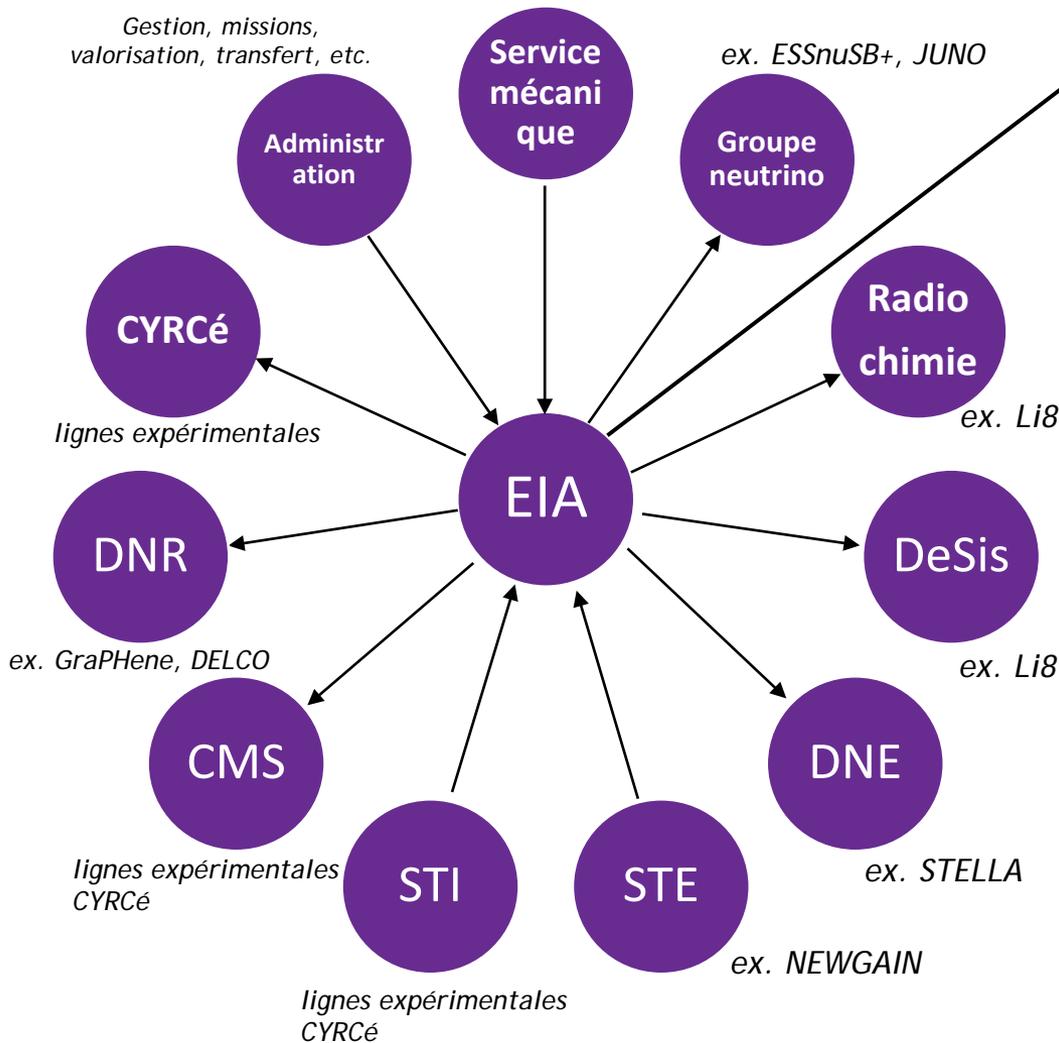
**Francis
OSSWALD**
IR



- Système Faisceau
- Coordinateur technique de projet



Relations entre l'équipe et les autres unités IPHC



+ Collaborations avec les autres laboratoires de l'IN2P3, la communauté des accélérateurs, les autres laboratoires : IRFU, GANIL, CERN, ESS, Univ Uppsala...

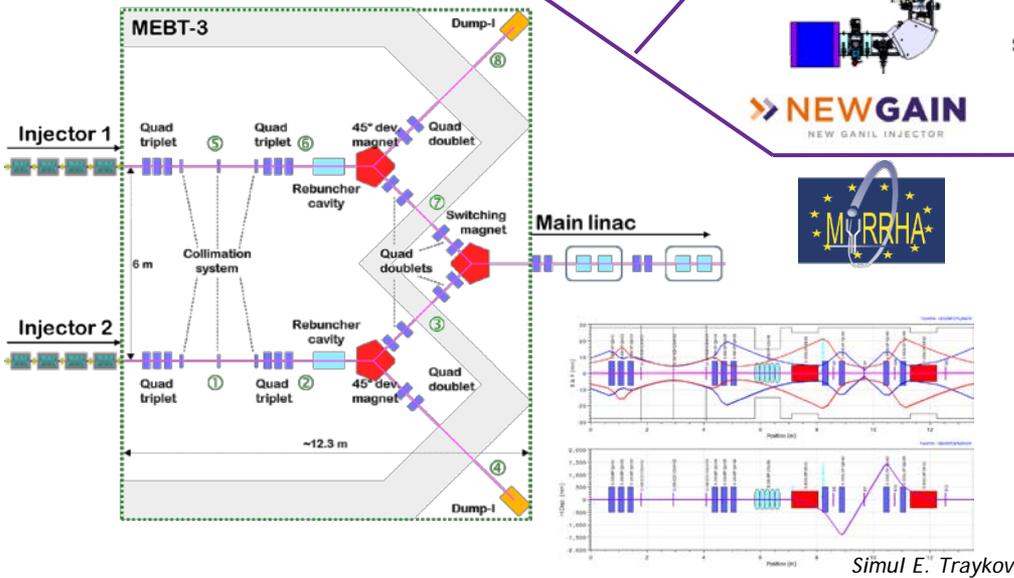
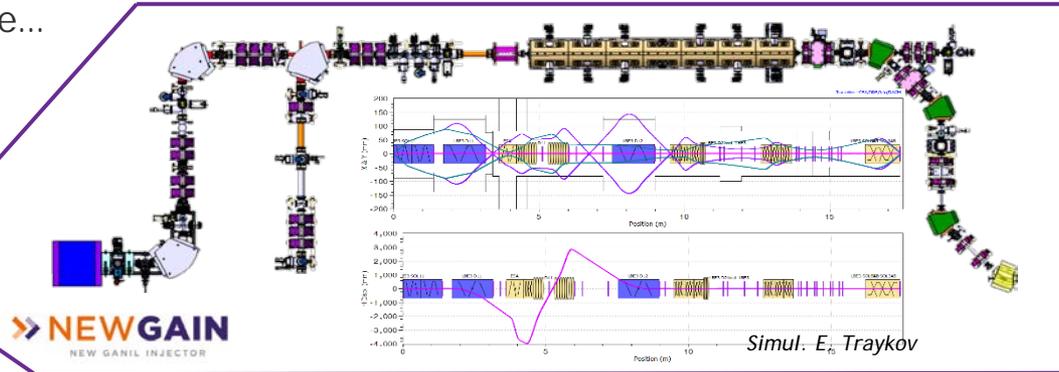
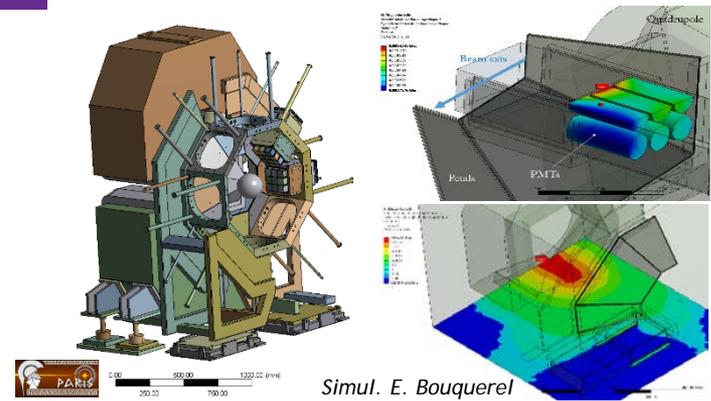
Participation aux réseaux

- Réseau Instrumentation Faisceau (RIF),
- SFP Div Accélérateurs  Société Française de Physique
- GDR Sciences of Particle Accelerators (SCIPAC)  Sciences of Particle Accelerators

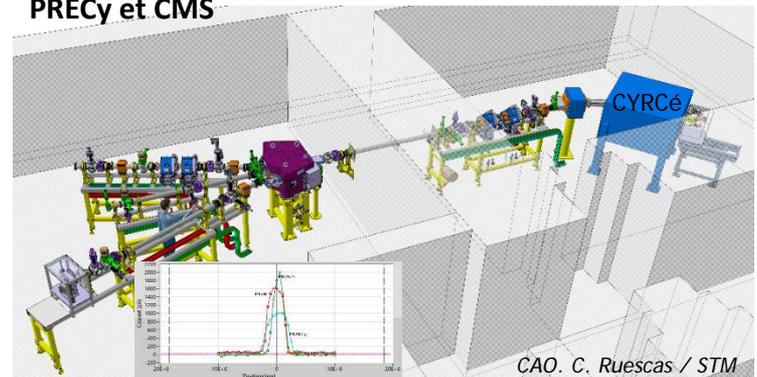
2 axes d'activités

1 - Transport & Dynamique faisceaux

- Dynamique faisceau, transport de faisceaux intenses et radioactifs,
- Conception de lignes et d'équipements de transport, de sélection et de manipulation de faisceau,
- Caractérisation, paramétrage de faisceaux,
- Tests mécaniques, techniques du vide...



lignes de faisceau PRECy et CMS



2 axes d'activités

2 - Diagnostics faisceaux

Plusieurs métiers

Electrotechnique

Electronique

Informatique

Automatisme

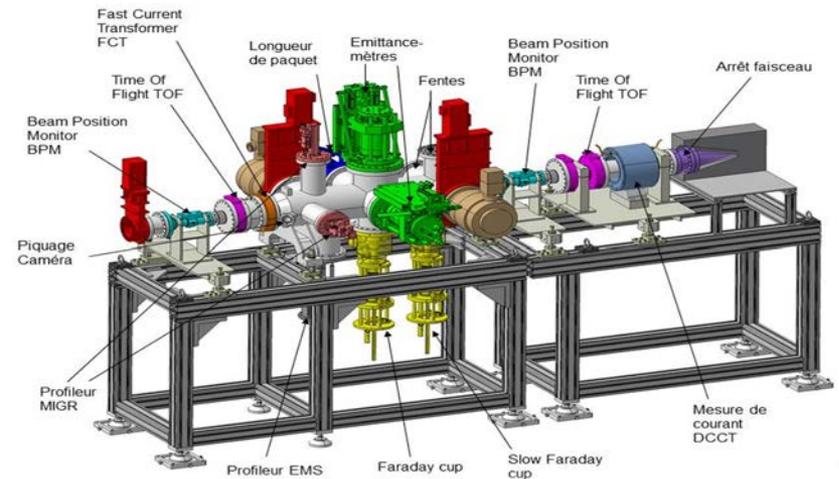
Mécanique...

- Réalisation de systèmes pilotés,
- Intégration mécanique,
- Développement de bancs de tests,
- Qualification...

Conception
d'équipements de
diagnostics de faisceau

Exemple: Banc de test injecteur- projet SPIRAL2

- Réalisation intégrale de diagnostics (émittance mètres) commandés sous EPICS, un arrêt faisceau primaire pour la ligne moyenne énergie
- Intégration du banc de test injecteur (BTI) ainsi que sa gestion



➔ Principe

Emittance:

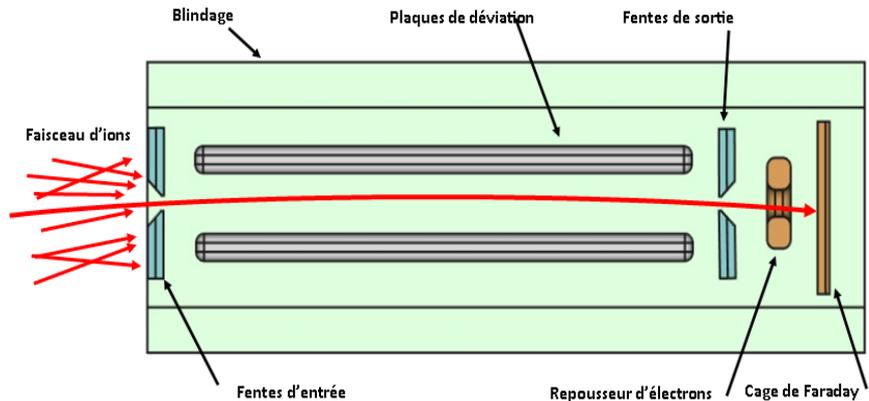
Mesure de la divergence angulaire associée à la trajectoire d'une particule.

Dans les faits:

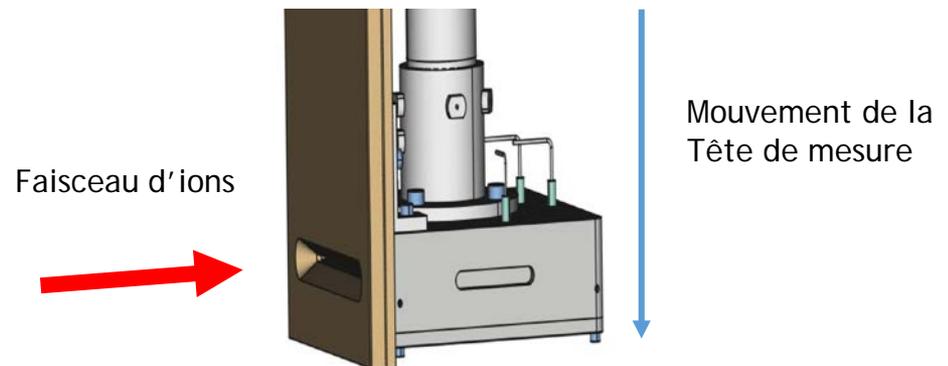
- Une particule chargée peut-être déviée par un champs électrique.
- À chaque position dans le faisceau, une rampe de tension est appliquée sur les plaques de déviation.
- La DDP induite permet aux ions de bonne énergie d'être dévier et traverser l'ouverture des fentes et finir dans la cage de Faraday, où l'on pourra lire une intensité et reconstituer l'émission.

Les données d'émission sont un paramètre primordial aux opticiens pour qualifier le transport faisceaux avant injection dans les accélérateurs.

Principe scanner d'émission Allison



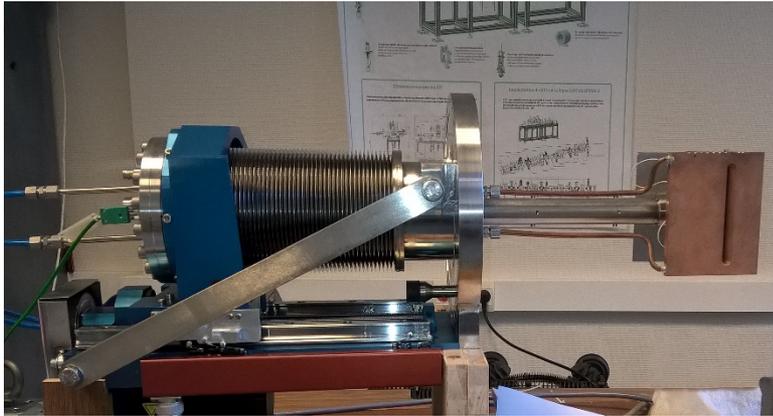
Tête de mesure d'émission



Diagnostics faisceau

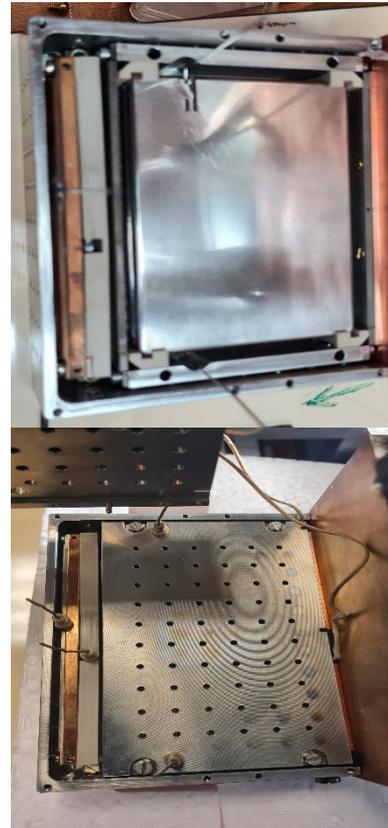
Emittance mètre

➔ Mise en œuvre technique



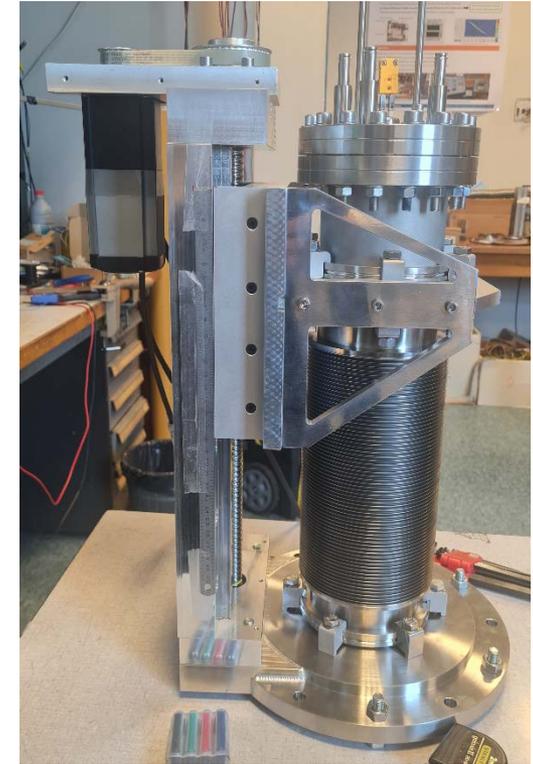
Emittance mètre IPHC - JINR

Précision de mouvement: 0,1mm
Pression de nominal: 10^{-7} mbar
Course: 180 mm
Poids: 50kg



Tête de mesure

Taille:
100 x 100 x 35 mm
Ouverture des fentes: 0,10 mm
Gamme de mesure: du pA au μ A
Pas du scanner: $\leq 0,1$ mm



Emittance mètre IPHC - IA

Structure modulaire
Multi-diagnostics
développé au sein de
l'équipe

Diagnostique faisceau

Emittance mètre

➔ Contrôle et acquisition

Processeur/CPU

Cartes
d'acquisition et
de commandes

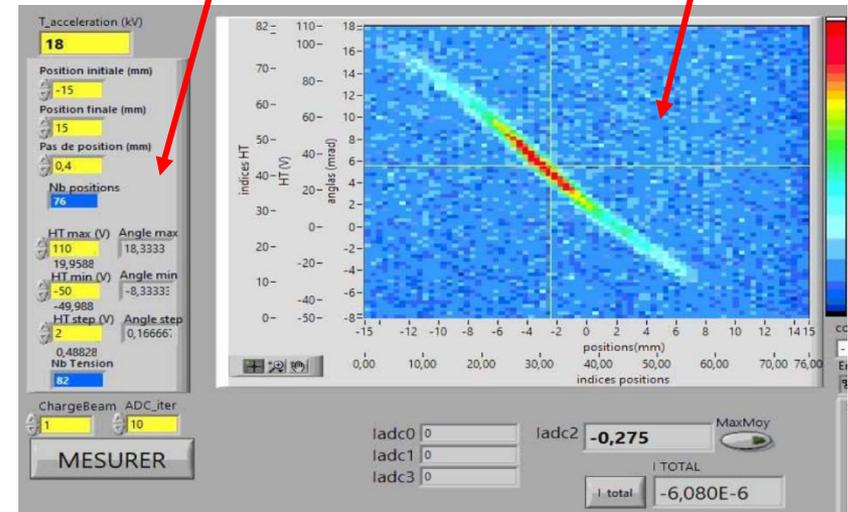


Contrôleur CRI0

Avantage de ce contrôleur:
Le programme est enregistré dans la CPU
Données exporté sur le réseau informatique et
accessible via un exécutable sur PC

Caractéristiques de
réglages

Figure
d'émission



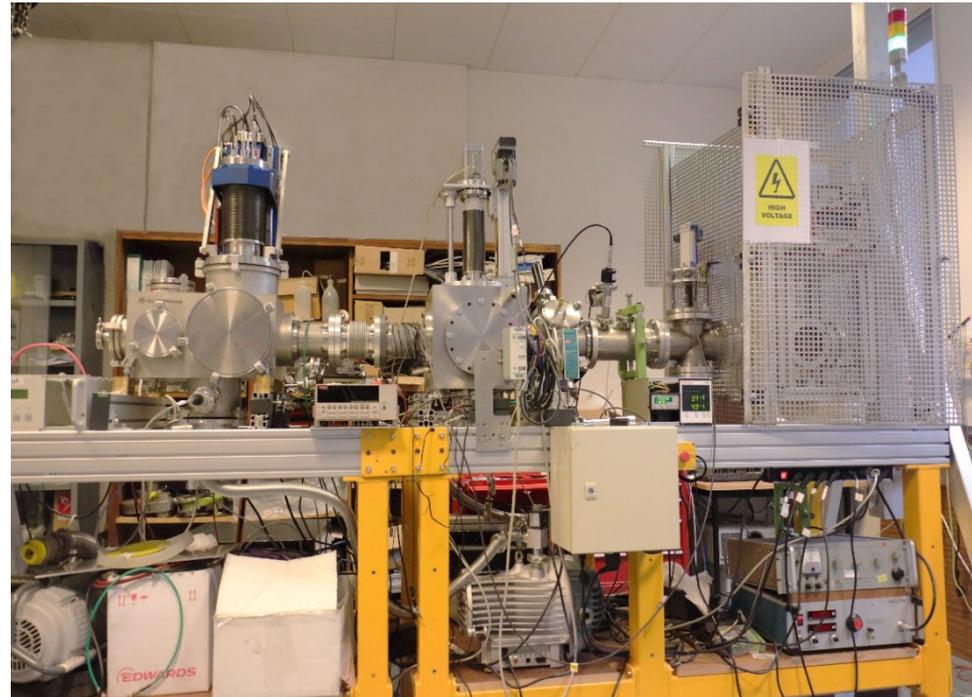
Interface utilisateur

Diagnostique faisceau

Développement d'un banc de test

Aspects pratiques/objectifs:

- Valider les choix technologiques.
- Certifier la tenue sous vide des diagnostics.
- Confirmer les aspects mécaniques sous charge.
- Qualifier les diagnostics.
- Valider toute la chaîne d'acquisition et l'interface utilisateur.
- Permet aussi d'utiliser le faisceau pour d'autres applications (calibration, tests comparatifs...) avec souplesse et facilité
- Montrer à des étudiants une application concrète d'une telle installation.



Banc de tests



Les différents diagnostics ont principalement été développés et réalisés dans notre équipe.

Diagnostique faisceau

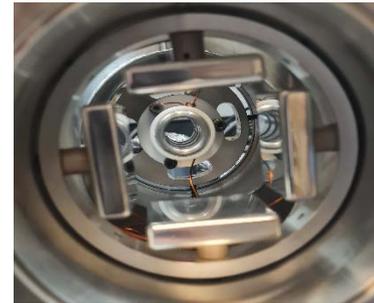
Développement d'un banc de test

Composition:

- Plateforme haute tension.
- Source d'ion césium 133 1+.
- Lignes et chambres à vide.
- Diagnostics.
- Eléments optiques.



Profilleur à 1 fil



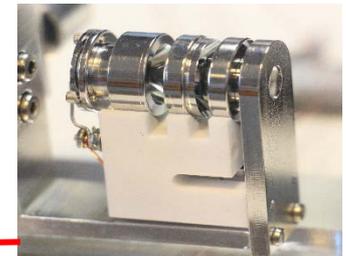
Déviateurs électrostatique



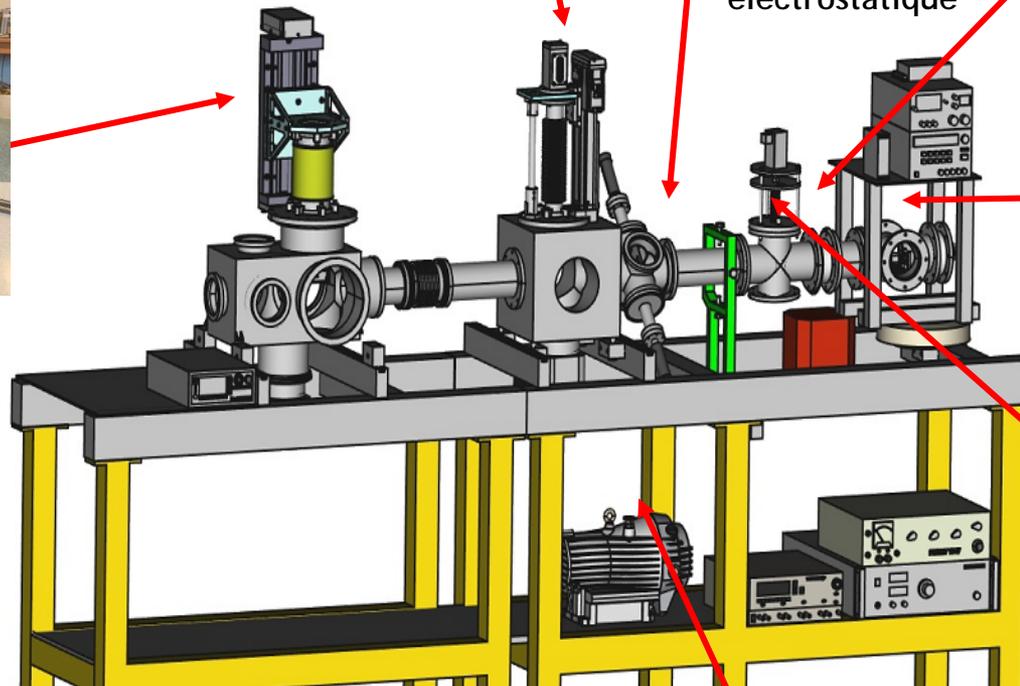
Einzel lens



Emittance mètre
IPHC - IA



Source HWIG-250



Banc de tests

Pompe à vide



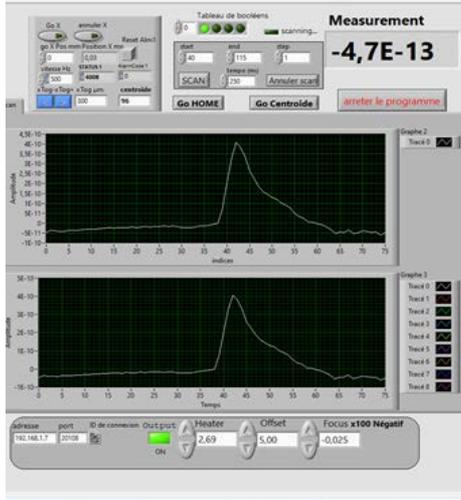
Cage de Faraday

Dimensions:

- Longueur: 3m20
- Largeur: 0,80m
- Hauteur: 2m20

Emittance mètre

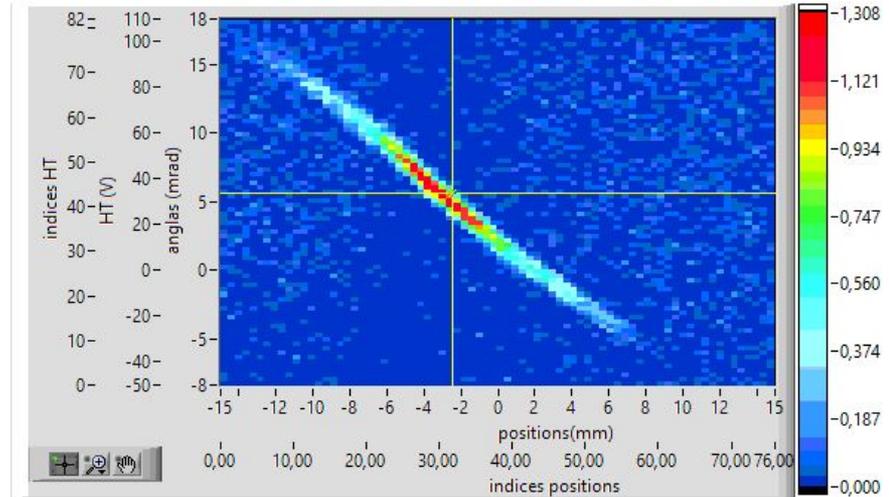
Résultats



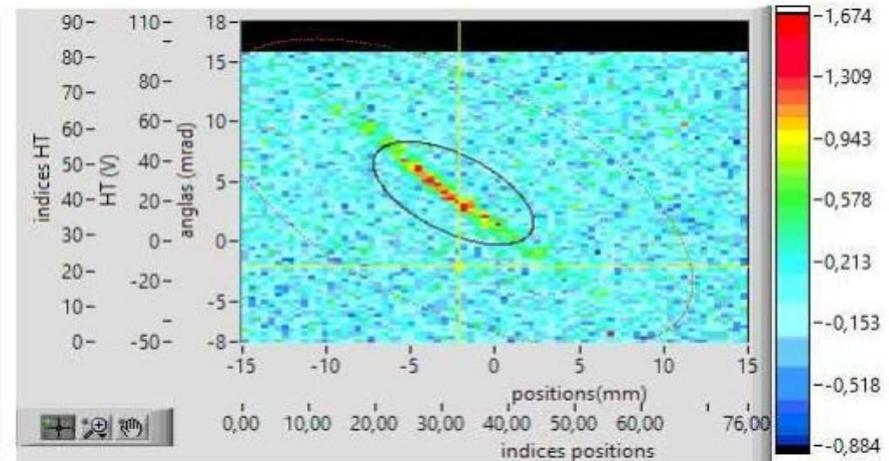
Profil d'un faisceau; Ø fil: 0.28mm

Facteur Bruit (noise) : 1,200000
Emit.norm (pi.mm.mrad) : 0,117449
Emit. (pi.mm.mrad) : 18,960927
 $C_g x'$ (mrad) : 5,801716
 $C_g x$ (mm) : -2,319822
Beta (mm/pi.mrad) : 1,215309
Gamma (mrad/pi.mm) : 1,229656
Alpha : 0,703144
 $\beta * \gamma - \alpha^2 = 1 : 1,000000$
 Σ : 4,828604
 Σ : 4,800352

fact noise	ϵ (mm.mrad)	ϵ_{norm} (mm.mrad)	C_{gx} (mm)	C_{gy}
1,2	18,961	0,117449	-2,31982	5,8



Emittance du faisceau Acc:18kV; Courant: 1.2nA



Calcul d'émission



Le développement de ce diagnostic a abouti vers une licence de savoir faire

Merci pour votre attention !