



Conseil Scientifique du LPSC

Activité Sources d'Ions

T. André, J. Angot, Ch. Peaucelle, T. Thuillier

Présentation du pôle Accélérateurs et sources d'ions	Ch. Peaucelle
Principe d'une source RCE	T. Thuillier
Etude du plasma de sources d'ions RCE, SPIM et ECRIPAC	T. Thuillier
ASTERICS, Source d'ions de l'injecteur NEWGAIN	T. Thuillier
Source d'ions SEISM à très haute fréquence pour le projet 60 GHz	T. André
Booster de Charges	J. Angot
Conclusion et perspectives	Ch. Peaucelle

◆ Position et stratégie

- ◆ Étudier et développer des sources d'ions à la résonance électronique cyclotronique (ECR)
- ◆ Étudier et développer des accélérateurs ou leurs sous-systèmes d'accélérateurs et les faisceaux associés
- ◆ Exploiter et développer la plateforme GENESIS de production de neutrons

◆ Expertises développées :

R&D Source ECR:

- Ions Lourds
- Ions Multi-chargés
- Booster de charges
- Source compactes
- Très haute fréquence (60GHz)

Dynamique faisceau :

- Design de ligne basse énergie, linac
- Commissioning
- Fiabilité - Compensation des pannes
- Effets non-linéaires
- Charge d'espace et compensation

RF :

- Coupleurs de puissance
- Multipacting
- Modèle de cavité/faisceau et systèmes associés

Activités transverses :

- Modélisation magnétique, HF, Multiphysique
- Modélisation et simulation plasma
- R&D Diagnostics faisceau: Profileur/ Emittance-metre
- Design d'élément magnétique, HT, CEM
- Systèmes ultra-vide
- Machine learning pour les accélérateurs

Membres du Pôle : 20 personnes

15 permanents : 1CR, 9 IR, 3 IE, 2 AI

5 non permanents : 1 post-docs, 1 Doc, 2 CDD, 1 apprenti

Thomas André

Julien Angot

Maud Baylac

Laurent Bonny

Frédéric Bouly

A. Cernuschi (Doc)

Benjamin Cheymol

Emmanuel Froidefond

Thomas Gémond (CDD)

Y. Gómez Martínez

Quentin Hars (CDD)

Etienne Labussière

Myriam Migliore

Christophe Peaucelle

Adrien Plaçais (post-doc)

Solenne Rey

Samuel Roni

Patrick Sole

Thomas Thuillier

Martin Veniere (apprenti)

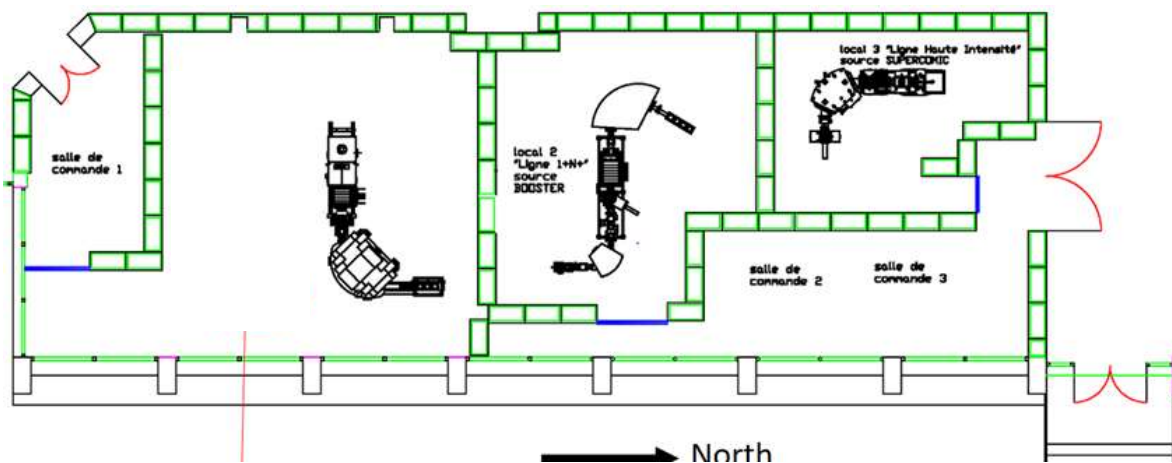
Evolution Récente :

- départs de T. Lamy (2016) D. Bondoux (2022)
- départ de J.-M. De Conto (PR) fin 2023
- Arrivée C. Peaucelle en 2021
- Départ de T. Cabanel (juillet 2023) et arrivée de S. Roni (avril 2023)
- Pérennisation T. André en IR (mars 2024)

- ◆ De nombreuses collaborations et partenariats: IN2P3 (IJCLab, GANIL, IPHC), national (CEA/IRFU, CEA/IRFM, DSBT, ONERA, SIMaP, LPGP, LaPlace LNCMI) et international (SCK-CEN, CERN, LNL, JYFL, JAEA, RAL)
- ◆ Participations actives et récurrentes aux offres de formations autour des accélérateurs et sources d'ions:
 - ◆ JUAS (Joint Universities Accelerator School)
 - ◆ ANF Ecole Accélérateurs
- ◆ Participations aux comités d'organisation et scientifique des conférences du domaine : IPAC, HB, HIAT, AccApps, ECRIS
- ◆ Deux à trois stages de niveau M1 à M2 sont en général effectués par an ainsi qu'en moyenne une thèse soutenue tous les 1 à 2 ans :
- ◆ Thèses soutenues récemment :

Bishu Bhashkar	(T. Thuillier, 2022),
Mathieu Debongnie	(J.-M. De Conto, co-encadrant F. Bouly, 2021),
Alexandre Leduc	(L. Maunoury, co-encadrant T. Thuillier, 2019),
Julien Michaud	(J.-M. De Conto, 2019),
Axel Poyet	(J.-M. De Conto, 2021),
Antonio Mendez	(T. Thuillier/T. Minea), abandon 01/2024
Andréa Cernuschi	(T. Thuillier/T. Minea), 2023-2026

- ◆ Equipe source créée en 1997, suite à la fermeture du cyclotron SARA
- ◆ Equipe Pole unifiée en 2008 pour augmenter synergie activités accélérateurs et sources d'ions
- ◆ Missions historiques:
 - répondre aux besoins en faisceaux d'ions exprimés par les physiciens IN2P3 (intensité, espèces atomiques)
 - Effectuer une R&D source d'ions au meilleur niveau mondial
- Laboratoire Source d'ions aménagé depuis 2004 (bat. 8)
 - 3 lignes d'analyses de source d'ions + Local LNCMI (->2025)



Projets « Sources d'ions » en cours

Projet	Porteur	Période	Budget	Collaboration	RH Pole 24	RH LPSC 24
NEWGAIN /ASTERICS	TT	2021-2031	Equipex+ env. 500 k€	GANIL, LPCCaen CEA/IRFU	1,3 ETP	1,2 ETP SERM : 0,9 Elec : 0,3
R&D Booster de Charges	JA	2021-2030	MP Ions RA :12 k€/an PACIFICS: 230 k€ RP : 15 k€	GANIL, RAL, LNL, JYFL	1,5 ETP	1,2 ETP SERM : 0,6 Elec : 0,2 SDI : 0,25 Plasma : 0,15
60 GHz/SEISM	TA	2019-2028	MP Ions Stables : 8 k€ PACIFICS : 750 k€	LNCMI	1,85 ETP	0,8 ETP SERM : 0,5 Elec : 0,1 SDI : 0,3
ECRIPAC	TT	2023-2026	Thèse financée par UGA MP ECRIPAC : 2k€/an	LAPLACE	1,3 ETP	/
PACIFICS	MM	2022-2027	Equipex+ Réparti dans projets+ 250 k€ pour jouvence globale	CEA IRFU	0,55 ETP	0,5 ETP SERM : 0,2 Elec : 0,2 SDI : 0,1

Avec le soutien à l'ensemble de ces projets des services administratifs, patrimoine et infrastructures, hygiène et sécurité et services techniques (mécanique, électronique, SDI, informatique) du LPSC

- **Projets et upgrades des installations de sources du LPSC**

- 1. Major upgrade of the 60 GHz ion source prototype**

- permanently installing the SEISM ion source at the LPSC → developing **superconducting magnets**
- study the production of ultra-intense ions continuously → **upgrade the gyrotron for continuous operation 20 kW (@60 GHz)**
- Improve ion beam extraction → design of a **source extraction system based on SILHI**

- 2. Extend performances of the charge breeder ion source (booster)**

- Optimize the ionization efficiency (volume, frequency) and stability → implement **large diameter booster** and **tunable HF generator**

- 3. Upgrade the ion source characterization beamlines (performances, reliability and characterization)**

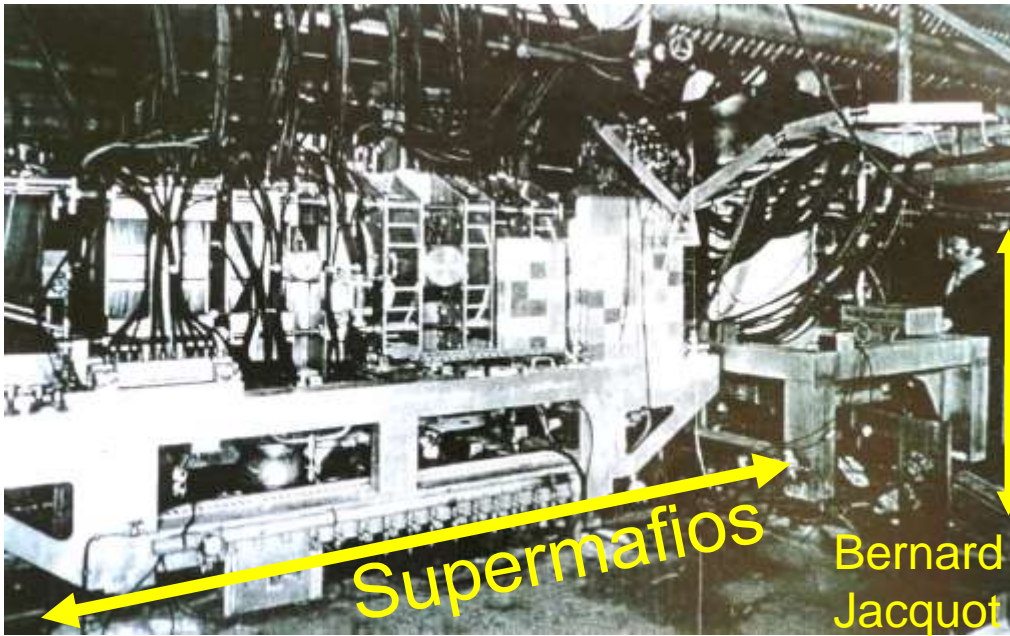
- Improve characterization → implement **instrumentation and diagnostics**
- Automatic control of experimental benches → implement **command-control for ion source beamlines**
- Increase magnetic confinement → **upgrade of 4 existing current power supplies** and **purchase of new high current supply (1300-70A)**



Introduction aux sources d'ions ECR

Thomas Thuillier

- ◆ 1^{ère} source d'ions dérivée d'une machine de fusion thermonucléaire linéaire au CEA Grenoble
- ◆ Années 70



- La légende dit qu'à l'ignition du 1^{er} plasma, la moitié de l'alimentation électrique de Grenoble a disjoncté!

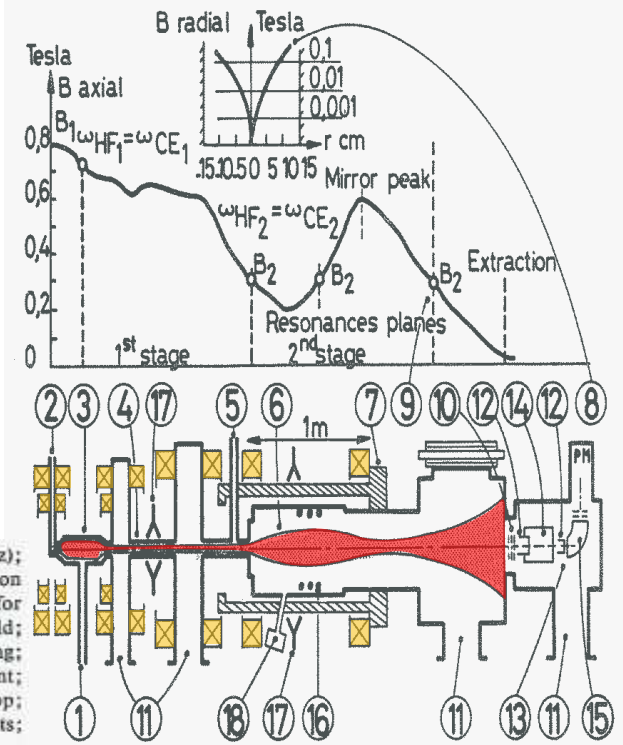


Fig. 1. 1) Gas injection; 2) Wave guide for RF₁ (16 GHz); 3) UHF cavity – source of plasma to be injected; 4) Diffusion zone; 5) Wave guide for RF₂ (8 GHz); 6) Accumulation zone for hot plasma; 7) Hexapole field coils; 8) Radial magnetic field; 9) Axial magnetic field; 10) Ion extraction; 11) Vacuum pumping; 12) Retractable faraday cup; 13) Ion abundance measurement; 14) Wien filter; 15) Energy analyzer; 16) Diamagnetic loop; 17) Microwave 8 mm interferometer for density measurements; 18) Beryllium window for X ray measurements.

Résonance Cyclotronique Electronique (ECR)

◆ Condition de résonance:

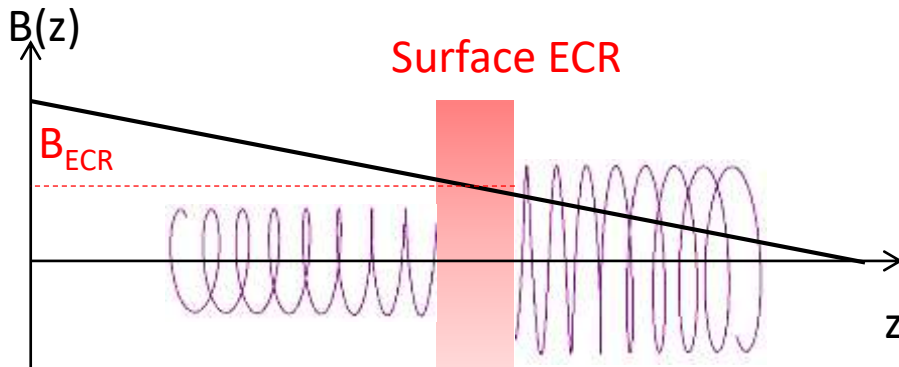
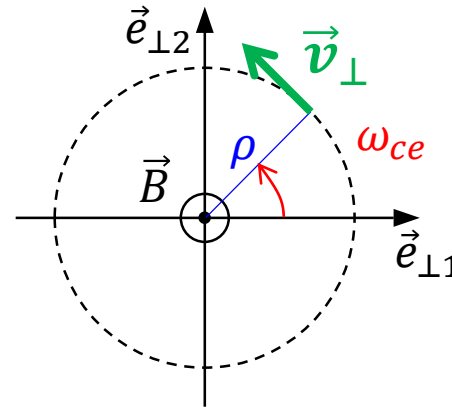
$$◆ 2\pi f_{HF} = \omega_{ce} = \frac{eB}{\gamma m_e}$$

◆ Rayon de Larmor: $\rho = \frac{v_{\perp}}{\omega_{ce}}$

◆ Augmentation de la vitesse v_{\perp}

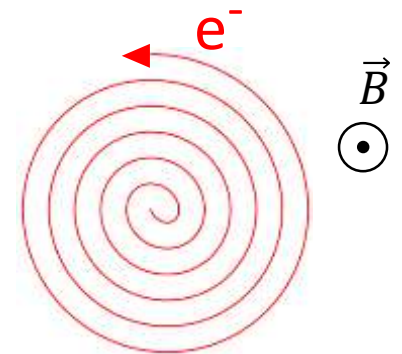
◆ v_{\parallel} reste constant

◆ Électrons accélérés dans un gradient de champ magnétique, sur une « surface de résonance »



$$\frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 + \frac{1}{2} m v_{\perp}^2 \quad \rightarrow \quad \frac{1}{2} m v_{\parallel}^2 + \frac{1}{2} m (v_{\perp} + \delta v_{\perp})^2$$

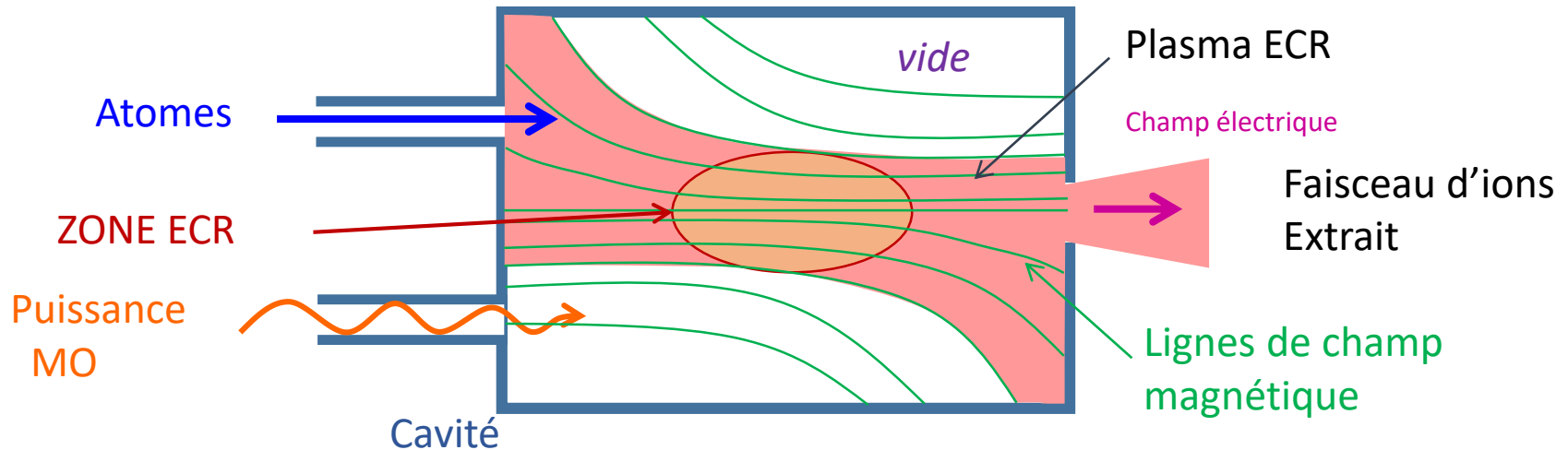
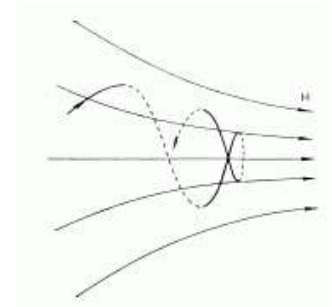
Trajectoire de l'électron



$$\vec{E}(t) = \cos 2\pi f_{HF} t \vec{x}$$

Principe de fonctionnement

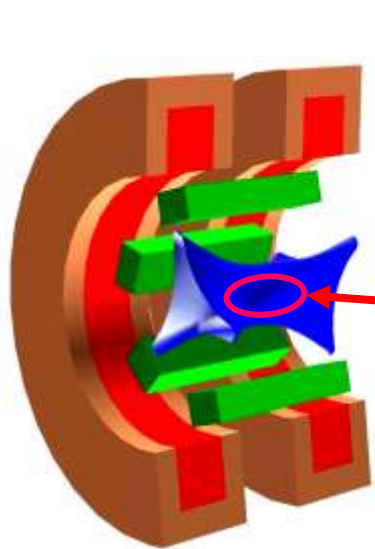
- ◆ Système d'injection d'atomes pour maintenir la densité du plasma constante
- ◆ Vide secondaire pour conserver la production d'ions multichargés (10^{-6} - 10^{-7} mbar)
- ◆ Injection de puissance micro-onde (MO) dans une cavité (multimode)
- ◆ Structure magnétique pour :
 - ◆ Transférer la puissance MO aux électrons via le mécanisme ECR
 - ◆ Confiner suffisamment longtemps les électrons pour les chauffer → keV
 - ◆ Confiner suffisamment longtemps les ions (froids) pour les multi-ioniser
 - ◆ Générer un plasma continu et stable
- ◆ Champ électrique pour accélérer les ions hors du plasma



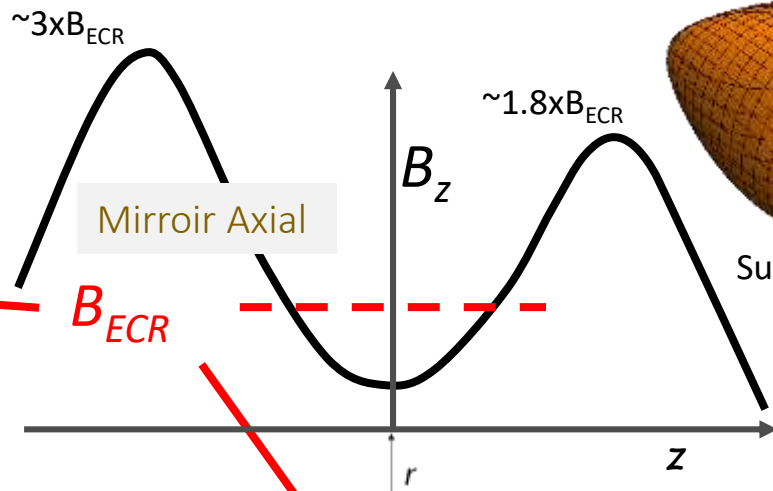
Champ magnétique à « minimum-B »

◆ Superposition d'un miroir magnétique axial et d'un miroir magnétique radial multipolaire

- ◆ La surface ECR ($|B|=B_{ECR}$) est fermée
- ◆ « Minimum-B », « bouteille magnétique »

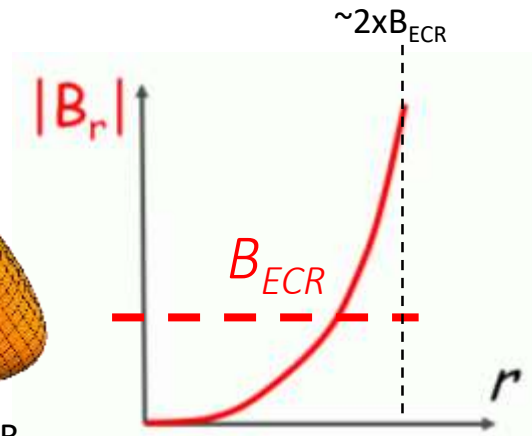


Source LBNL

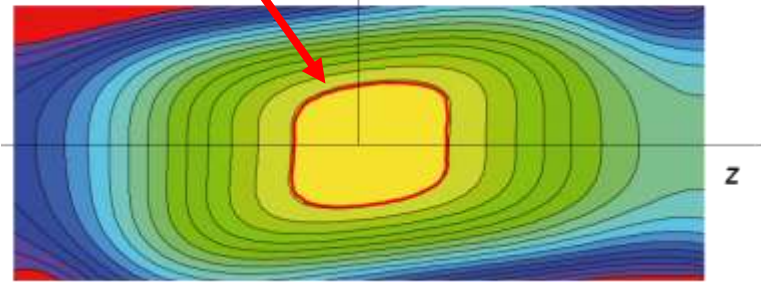


Miroir Axial

Surface ECR

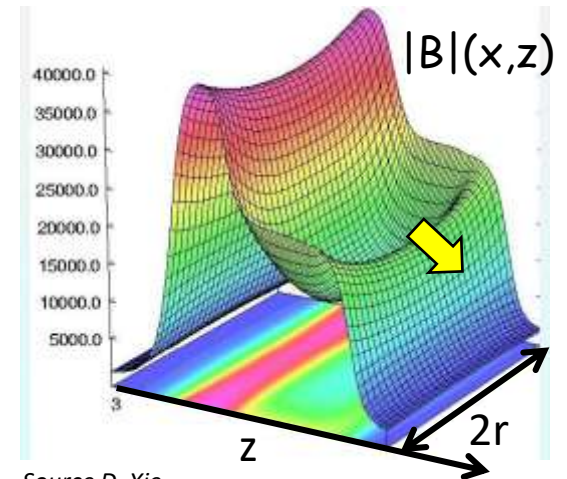


$$2\pi f_{HF} = \frac{eB}{\gamma m_e}$$



lignes Iso-B

Source RIKEN, Nakagawa



Source D. Xie

◇ Fréquence de coupure d'une micro-onde dans un plasma

$$\diamond \omega_{HF} = 2\pi f_{HF} \geq \omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0}}$$

$$\diamond n_e \propto f_{HF}^2$$

◇ Loi d'échelle :

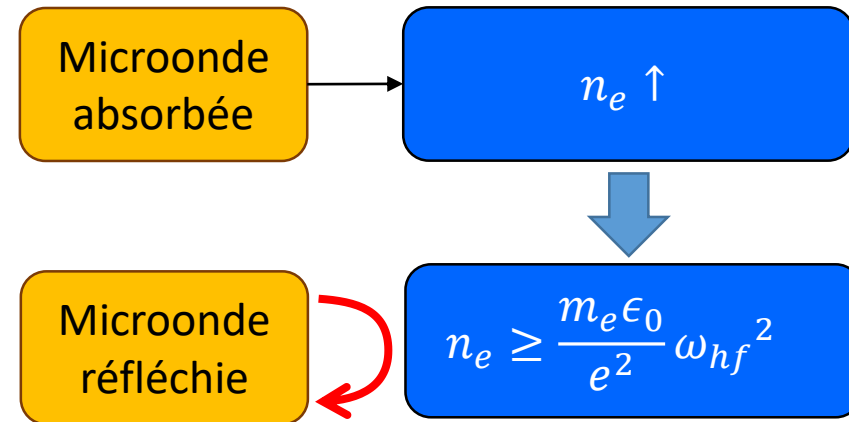
◇ L'intensité de faisceau d'ions dépend de la fréquence HF

$$\diamond I \propto n_e \propto f_{HF}^2 :$$

◇ Augmentation de l'intensité du faisceau d'ions lourds en montant la fréquence de chauffage ECR

◇ Mais $B \propto f_{HF}$:

◇ « Prix à payer » sur le champ magnétique de confinement



f_{HF} [GHz]	2.45	18	28	60
B_{ECR} [T]	~0.1	0.64	1	~2,1
Max (B(x,y,z))	~0.3	~2	~3.5	~7
Technologie	Aimants permanents	Aimants permanents, bobines cuivre, fer	supraconducteur	supra ou cuivre
I (mA)	0.02	1	2,4	11

Intérêt Technologique

- ◆ Machine sans pièce d'usure, fiable et robuste
- ◆ Production de fortes intensités d'ions multichargés applicable aux accélérateurs de particules
- ◆ Savoir-faire essentiellement empirique et phénoménologique (essai et erreur)

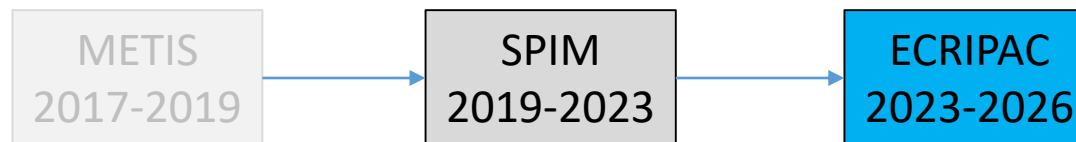
Intérêt scientifique

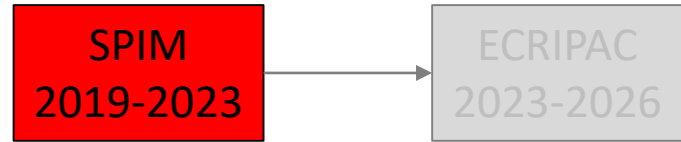
- ◆ Le plasma ECR est mal connu: de nombreux phénomènes fondamentaux restent peu ou mal compris
 - ◆ Plasma magnétisé, inhomogène, anisotrope et hors-équilibre thermodynamique
 - ◆ Extrêmement complexe à étudier (boîte noire, peu de lignes de visée)
 - ◆ Extrêmement complexe à simuler (dense, volumineux, échelle de temps de 10^{-13} à 10^{-1} secondes)
- ⇒ Fort intérêt de profiter des sources ECR pour étudier le plasma expérimentalement
- ⇒ Fort intérêt d'étudier le plasma par simulation pour mieux comprendre les mécanismes micro et macroscopiques sous-jacents



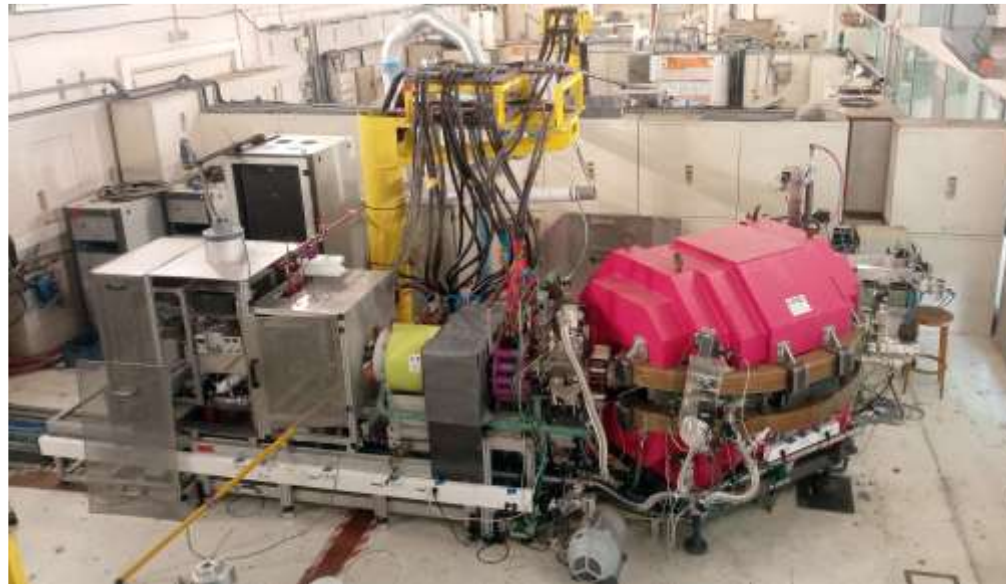
Simulation de plasma ECR

Thomas Thuillier





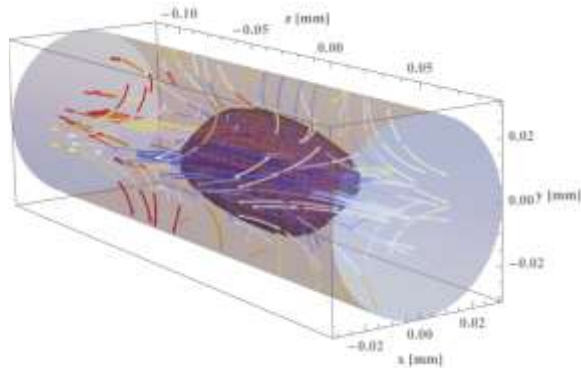
- ◆ SPIM=Simulation de Plasma de source d'Ions Multichargés
- ◆ Période: 2019-2023
- ◆ Collaboration avec le LPGP d'Orsay (co-encadrant T. Minea)
- ◆ Financement d'un doctorant (PRIME80, J.A. Mendez-Giono)
- ◆ Objectif du projet:
 - ◆ Etudier par simulation le processus de formation de l'émittance d'un faisceau d'ions issu d'un plasma ECR
 - ◆ Comparer les résultats de simulation et expérience avec la source PHOENIX V2, sur le « Banc For Courant »



Source PHOENIX V2 (verte)
sur le Banc For Courant

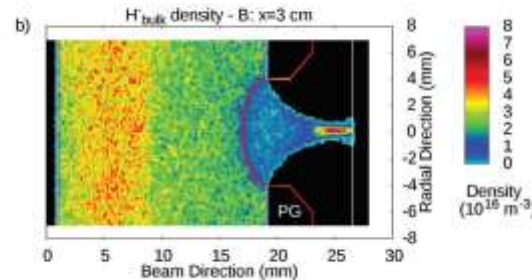
Suite de Simulations Requise

- ◇ (1) connaître le flux de particules sortant du plasma => **Besoin d'un code simulant le plasma de la source**
- ◇ (2) Les données de sortie de (1) sont utilisées dans le code ONIX (LPGP) d'extraction des ions du plasma
- ◇ (3) Les données de sortie de (2) sont utilisées comme entrée du code de transport d'ions



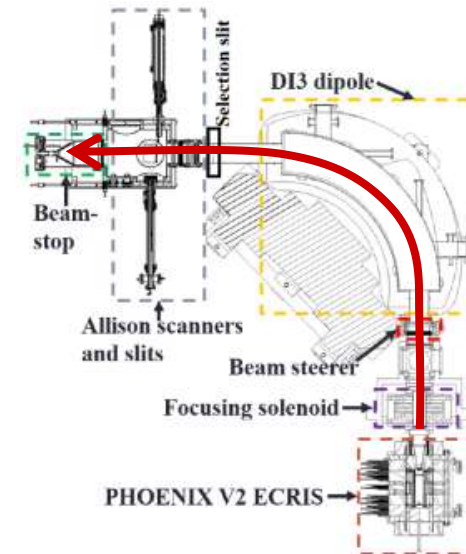
Nouveau et développé pendant le projet

Simulation du plasma ECR



~existant/pas étudié

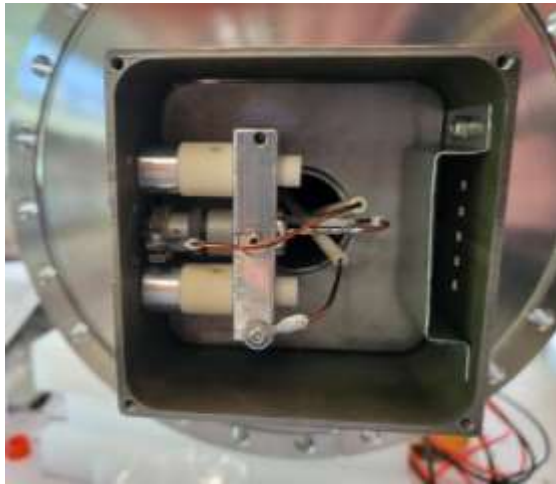
Simulation de la Gaine du plasma Et Extraction des ions Code ONIX (LPGP)



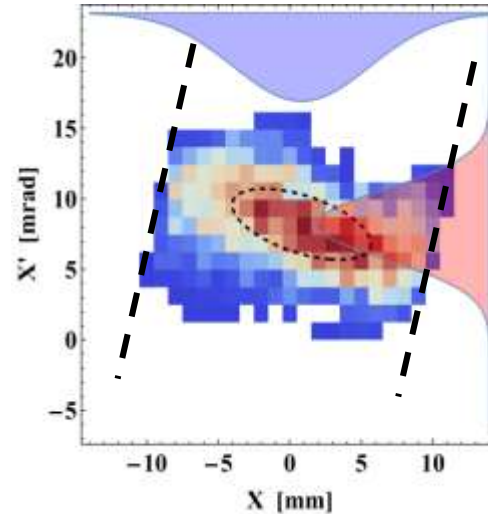
~existant / complété

Transport des ions avec un code local de « Tracking » de faisceau d'ions

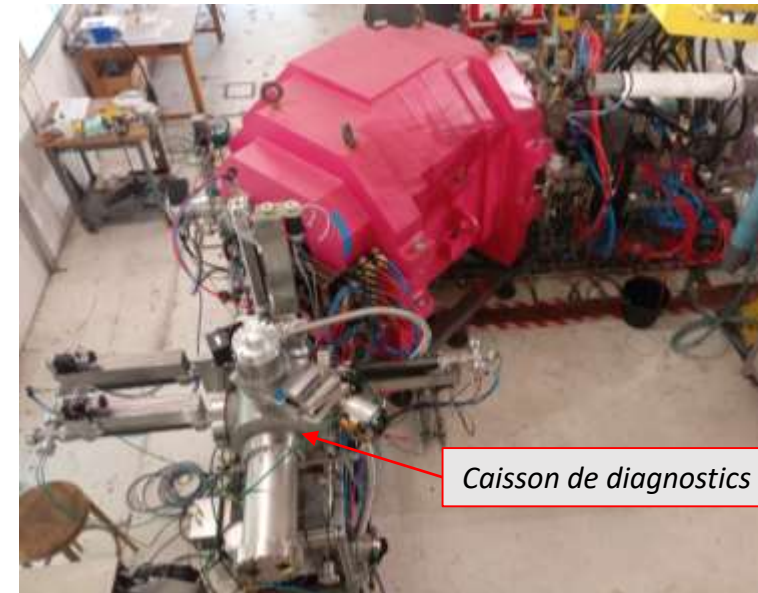
- ◆ Nouveau caisson de diagnostics
- ◆ 2 Emittancemètres Allison de grande ouverture complété de 2 fentes mobiles perpendiculaires
 - ◆ Mesure d'émittances 4 dimensions : XX' , YY' , XY' , YX'
- ◆ 1 Channeltron pour la spectroscopie des électrons émis par le plasma



Channeltron



Mesure d'émittance



Caisson de diagnostics

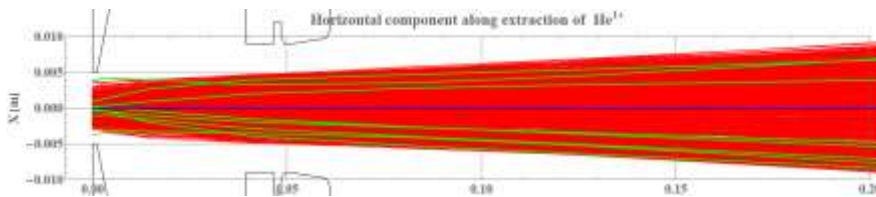


Emittancemètre

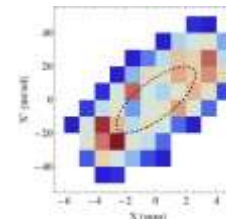
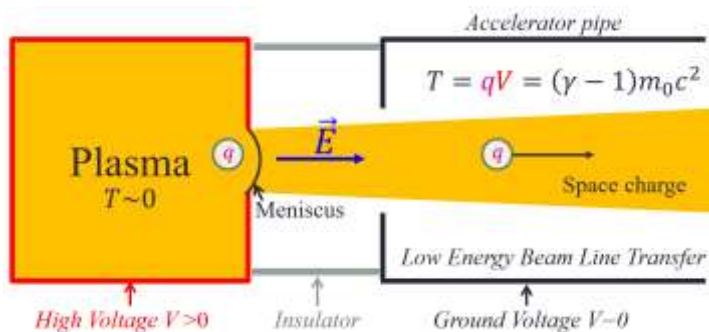


Fente mobile

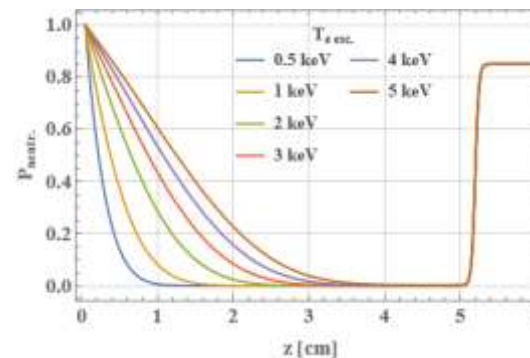
- ◆ Modélisation des éléments magnétiques et électriques
- ◆ Nouvelle modélisation d'un ménisque sphérique et de la charge d'espace du faisceau
- ◆ Objectif = reproduire les émittances de faisceau d'ions expérimentales avec le code de transport
- ◆ Difficulté: le dipôle magnétique, ne focalise pas du tout comme cela avait été calculé avant le projet. Perte de transport des ions dans le dipôle => incompréhension, investigations (nouveaux détecteurs ou nouveau dipôle => d'où vient le souci?)
 - ◆ Finalement: le coupable était le dipôle
- ◆ Code opérationnel mais reste à consolider / benchmarker



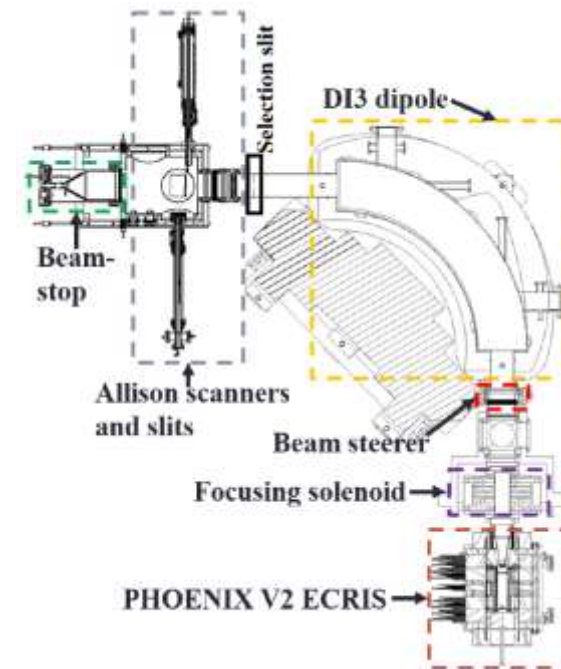
Simulation de l'extraction du faisceau d'ions



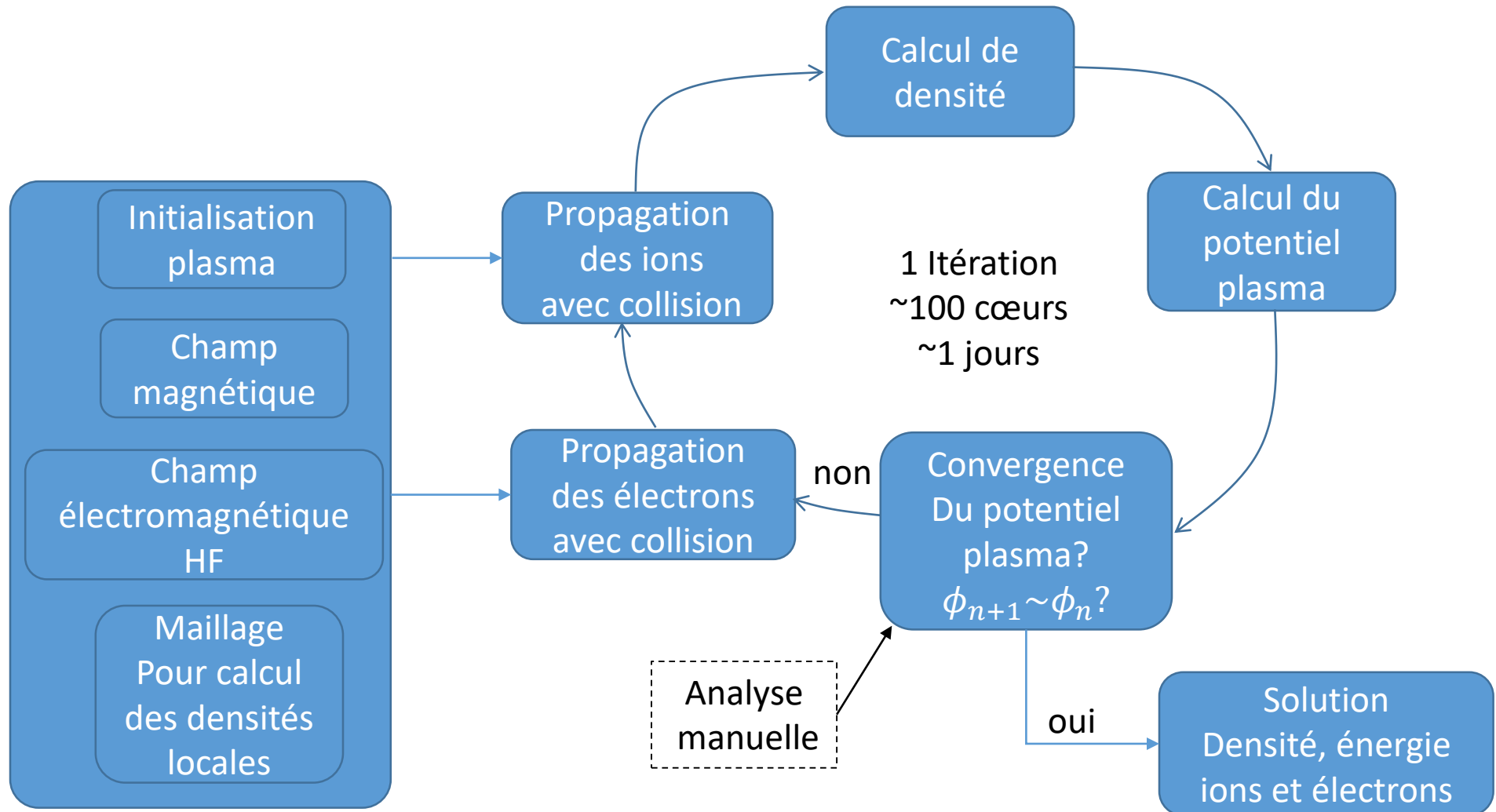
Émittance simulée



Courbe de compensation de charge d'espace en sortie de source



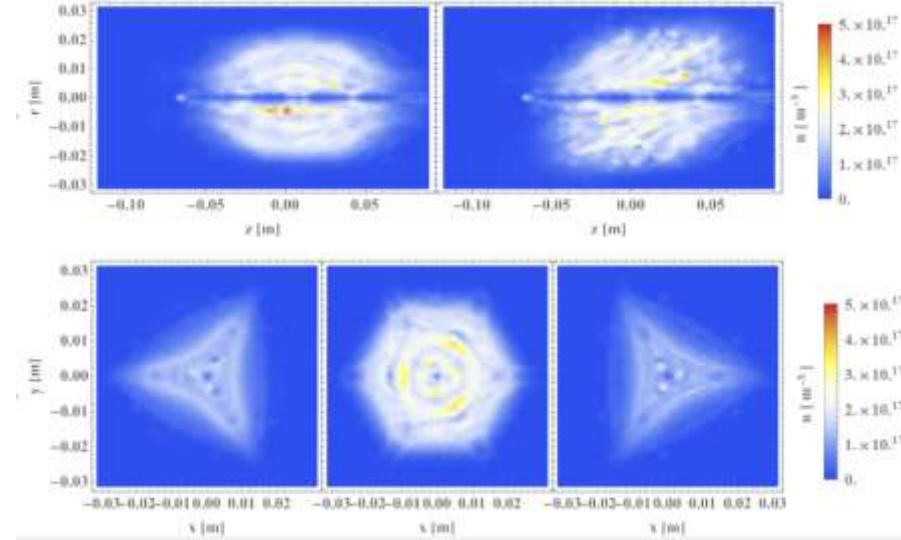
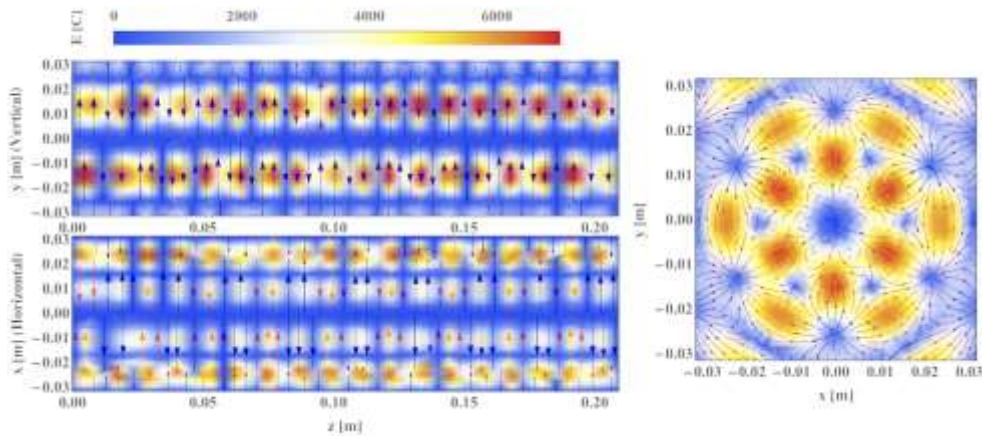
◇ Développement d'un code Monte Carlo itératif avec collision et calcul du potentiel plasma



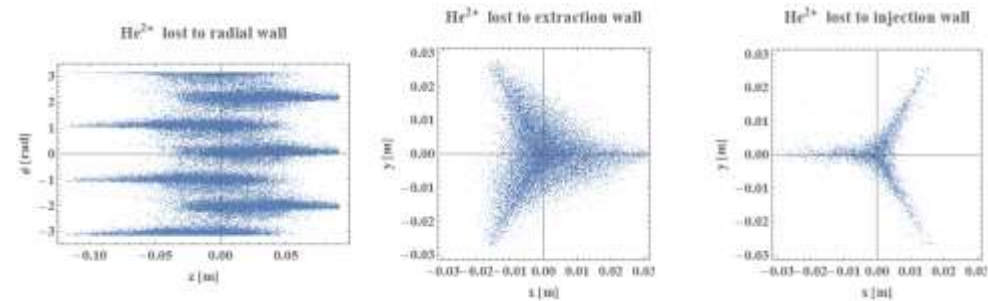
- ◇ Le code de simulation a été achevé pendant la thèse
- ◇ Mais les 1^{ers} résultats itératifs sont inattendus
- ◇ Densité creuse et pas de convergence du potentiel plasma!
- ◇ Investigation et origine du problème trouvée: carte de champ HF inappropriée



Le coupable



Carte de densité d'énergie électronique



Carte d'impact des ions à la paroi

- ❖ L'épidémie de COVID a eu raison de la santé du doctorant J.A. Mendez-Giono
- ❖ Thèse rédigée mais révision majeure demandée par les rapporteurs
- ❖ Abandon thèse 01/2024 , malgré inscription autorisée en 5^{ème} année
- ❖ SPIM est dans les limbes



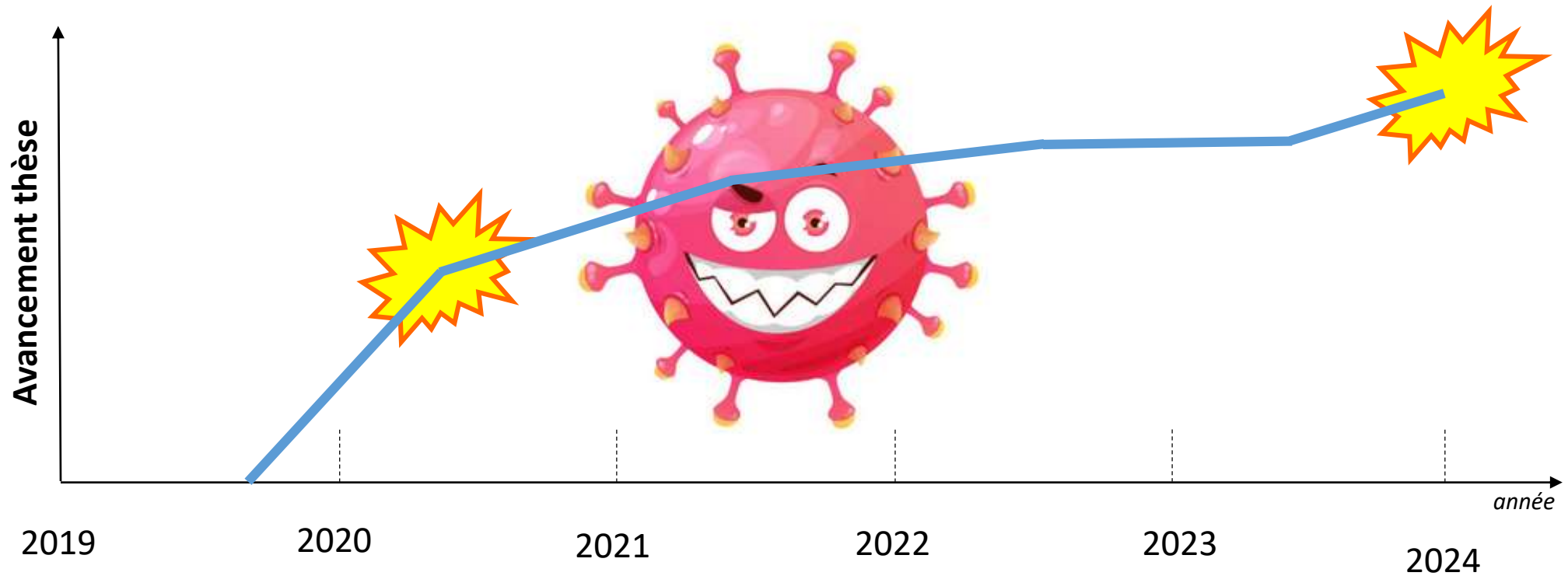
L'Encéphale

Volume 50, Issue 1, February 2024, Pages 75-84



Article de recherche

Impact du confinement sur la santé mentale des doctorants, une étude de cohorte dans une université française



- ◆ Embaucher un post-doc
- ◆ Consolider et valider le code plasma (« benchmarking »)
 - ◆ Ce code a un fort potentiel d'études par simulation innovantes
- ◆ Intégrer ONIX dans la chaine de code de simulation
- ◆ Terminer la comparaison simulation-expérience des émittances de source ECR avec la source PHOENIX V2

◆ ECRIPAC= Electron Cyclotron Resonance Ion Plasma Acceleration

◆ Idée originale de R. Geller et K.S. Golovanivski (1990)

◆ Période: 2023-2026

◆ Collaboration avec le LAPLACE Toulouse (co-encadrant L. Garrigues)

◆ Thèse de doctorat (UGA, A. Cernuschi)

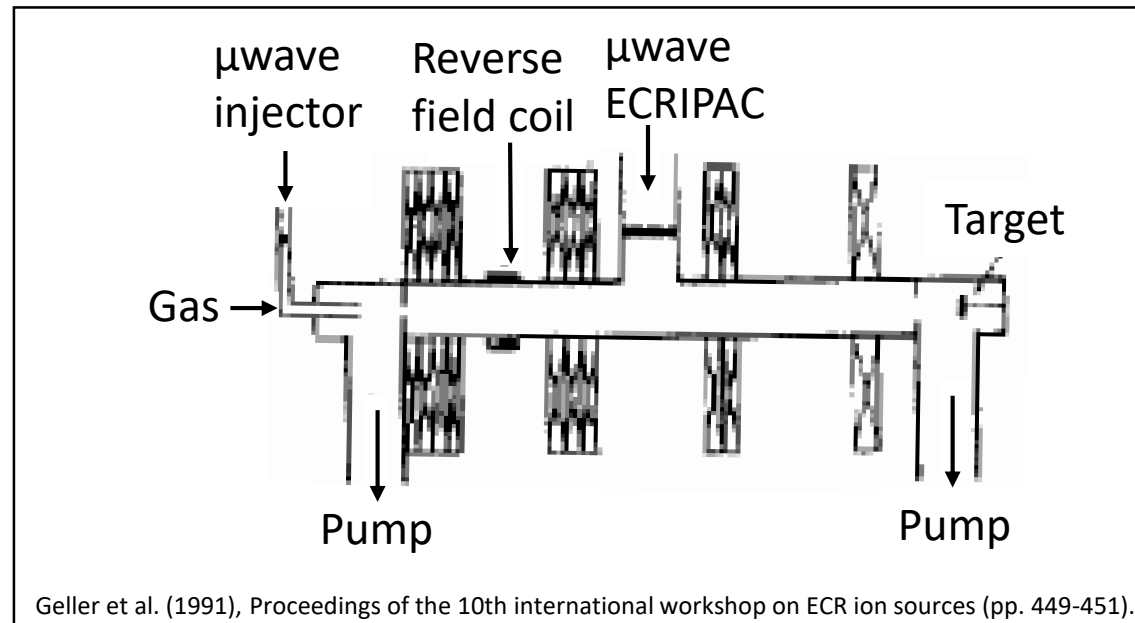
◆ Objectifs du projet:

◆ Etudier par simulation plasma PIC le concept d'accélération ECRIPAC

◆ Proposer un concept de machine de démonstration capable d'accélérer de ${}^4\text{He}^{2+}$ au delà de 7 MeV/A sur qq mètres

SPIM
2019-2023

ECRIPAC
2023-2026

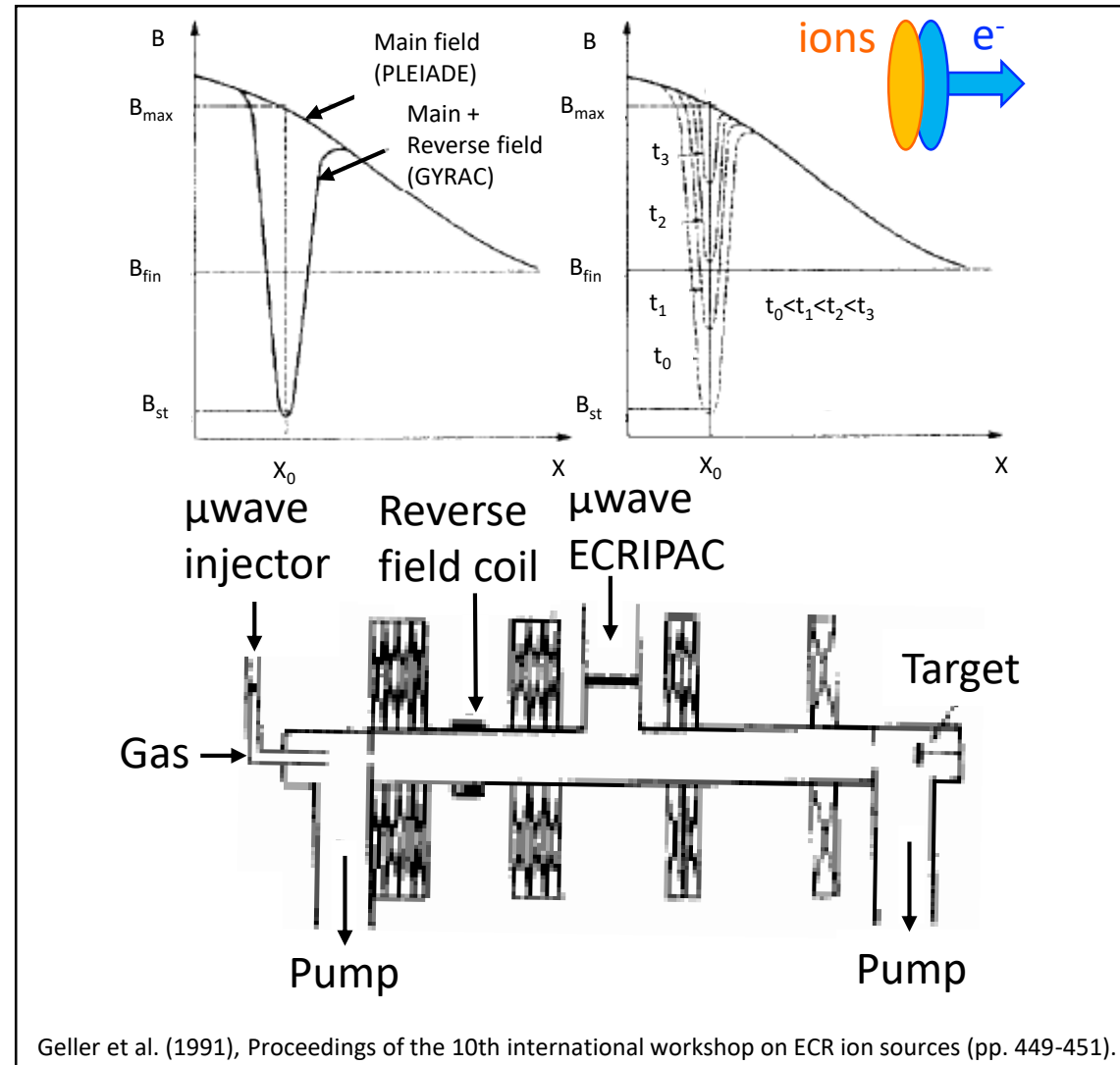
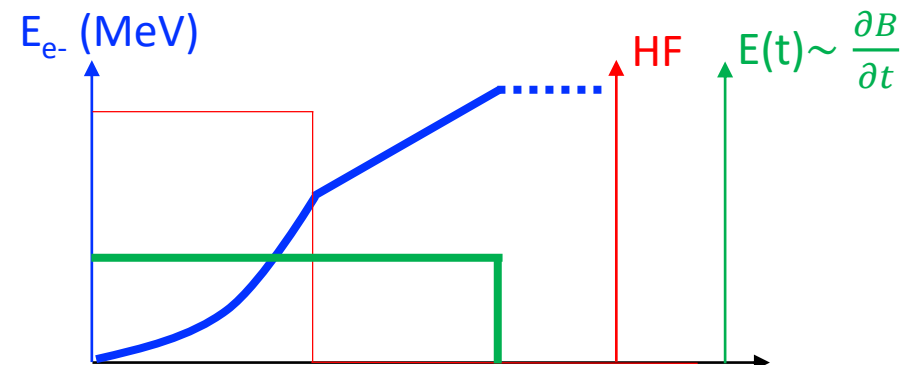


Structure magnétique

- Décharge plasma initiale
- **GYRAC** : cavité résonance, bobine pulsée
- **Étape PLEIADE** : tube de transport, long gradient de champ magnétique.

Working cycle

- **GYRAC – High Frequency (G-HF).**
- **GYRAC – Compression (G-C).**
- **PLEIADE (PL).**



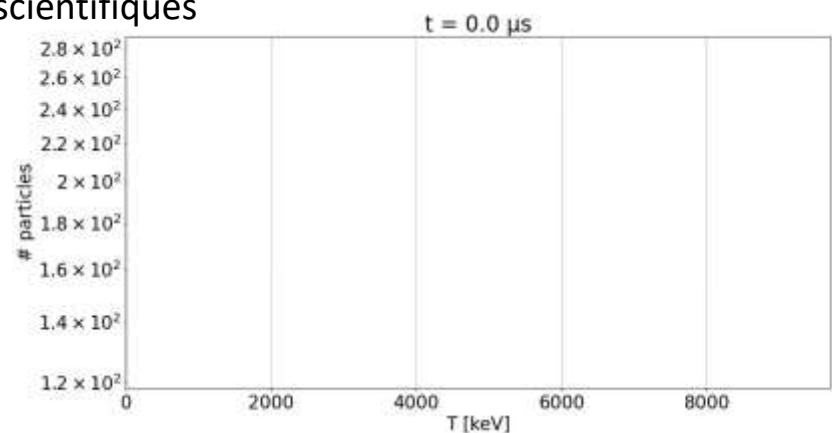
Geller et al. (1991), Proceedings of the 10th international workshop on ECR ion sources (pp. 449-451).

Avancées du projet ECRIPAC

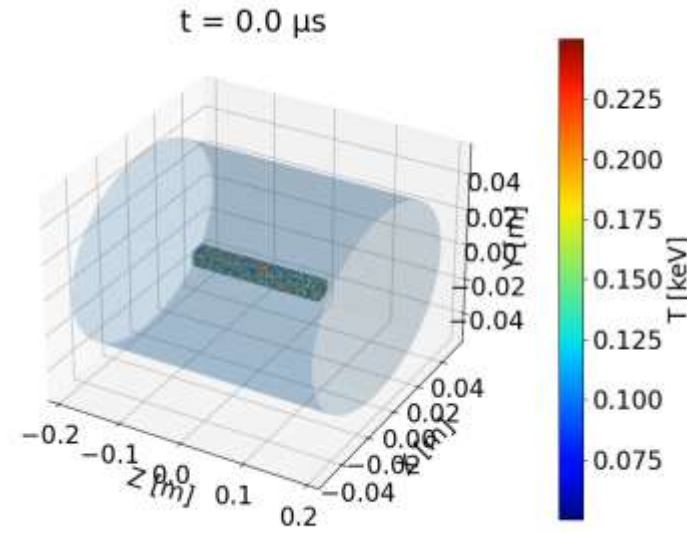
Nom de la tâche	2024				2025				2026						
	Tri 2	Tri 3	Tri 4	Tri 1	Tri 2	Tri 3	Tri 4	Tri 1	Tri 2	Tri 3	Tri 4	Tri 1	Tri 2	Tri 3	Tri 4
THESE ECRIPAC				01/10 ✓											
Début de Thèse			01/10	01/01 ✓											
Jalon: Fin étude bibliographique				01/03 ✓											
Jalon: dimensionnement machine ECRIPAC															
Jalon: Validation machine ECRIPAC avec un code Monte-Carlo électrons (rapide)							01/10 ✓								
Jalon: choix du code (plasma) PIC à utiliser								01/12							
Jalon: Fin de programmation du PIC										01/09					
Jalon: Fin étude par simulation PIC ECRIPAC											01/03				
Jalon: Fin rédaction thèse												01/06			
Jalon soutenance de thèse														01/1	

◆ Livrables:

- ◆ Thèse de doctorat Andrea Cernuschi
- ◆ 1 à 3 publications scientifiques



Accélération des électrons par effet GYRAC (Monte-carlo)



Validation phase GYRAC avec Monte-Carlo

- ◆ Communication en conférence pendant la thèse
- ◆ Après la thèse: séminaires dans laboratoires spécialisés en plasma, accélérateur et source d'ions, aimants pulsés et aimants supraconducteurs
- ◆ Construction d'une collaboration nationale ou internationale
- ◆ Soumission d'une réponse à AàP type ERC Synergy Grant pour concevoir et construire un démonstrateur de machine ECRIPAC
 - ◆ Longueur $\sim 3\text{m}$, Energie des ions $\sim 7\text{ MeV/A}$
 - ◆ Diagnostics d'analyse pour étude du plasma et caractérisation des pulses d'ions accélérés
 - ◆ Identification d'applications sociétales (création d'isotopes médicaux, radiographie flash, etc ?)



Projet NEWGAIN

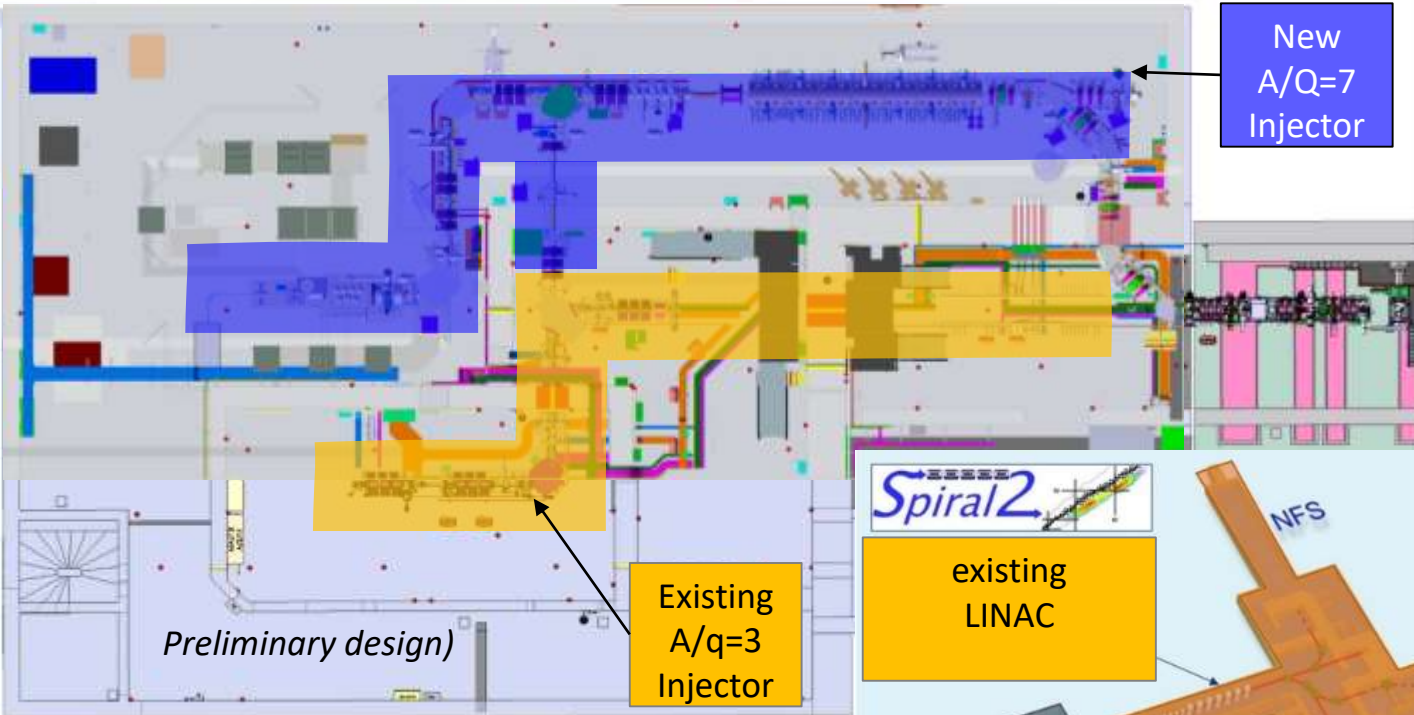
Thomas Thuillier

- ◆ CONTEXTE: Développement d'un nouvel injecteur A/Q=7 pour l'accélérateur SPIRAL2 au GANIL
- ◆ OBJECTIF: produire 10 pμA d'U³⁴⁺ en continu sur une durée de 3 à 5 semaines.
 - ◆ Très ambitieux
 - ◆ Nécessite de la R&D
- ◆ FINANCEMENT: ANR EQUIPEX+ (14 M€) + 2 M€ TGIR GANIL
- ◆ PERIODE ~ 2022-2032
- ◆ COLLABORATION MULTI-LABORATOIRES CNRS + CEA

- ◆ IMPLICATIONS DU POLE:
 - ◆ Gestion de 2 lots de tâches de premier plan: "Système" et "Source d'ions et plateforme HT"
- ◆ IMPLICATION DU LPSC
 - ◆ Mécanique source d'ions par le SERM
 - ◆ Instrumentation et électronique source par le Service électronique
 - ◆ Contrôle-commande par le SDI
- ◆ Collaboration nationale avec:
 - ◆ le CEA Irfu / DACM
 - ◆ le GANIL (futur exploitant)
 - ◆ le LPC Caen (plateforme HT)



PROJET NEWGAIN: NEW GANil INjector



- ◇ RFQ : entrée @ 10 keV/A
- ◇ Ion A/q=7
- ◇ Plateforme HT 70 kV

- ◇ Accélérer les ions jusqu'à l'uranium sur de longues périodes (3-5 semaines, 24/24-7/7)
 - ◇ 13 μA for $M \leq 100$
 - ◇ 10 μA for $M > 100$
- ◇ Minimiser le risque projet (~aimant supraconducteur)
 - ◇ $f_{ecr} \leq 28 \text{ GHz}$



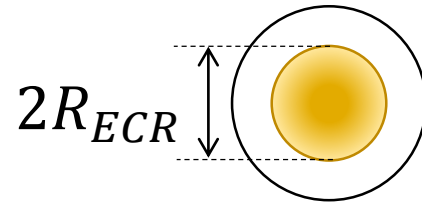
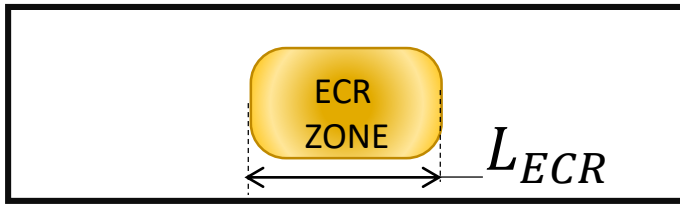
- ◇ Pas de source existante répondant au besoin
- ◇ Nécessité de développer une nouvelle source d'ions pour augmenter les intensités d'ions
 - ◇ Comment?
- ◇ Intérêt de garder le système de conception mécanique de la source VENUS pour réduire le risque projet

- ◇ Source de référence VENUS supraconductrice (NbTi), LBNL, 28 GHz
 - ◇ 10 μA U^{34+} « carton » 2 heures
 - ◇ 5 μA U^{34+} run de longue durée
- ◇ Sources en développement @ 45 GHz
 - ◇ 10 μA U^{34+} longue durée possible
 - ◇ Mais hors budget et très risquées (Nb_3Sn)



VENUS @ LBNL

Adaptation de la source au besoin



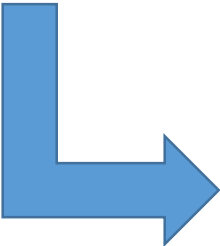
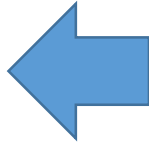
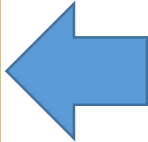
Analyse
phénoménologique
Multi-source @ 18 GHz

Loi d'échelle ECR:
 $I(\text{ions}) \sim n_e \sim f_{ecr}^2$

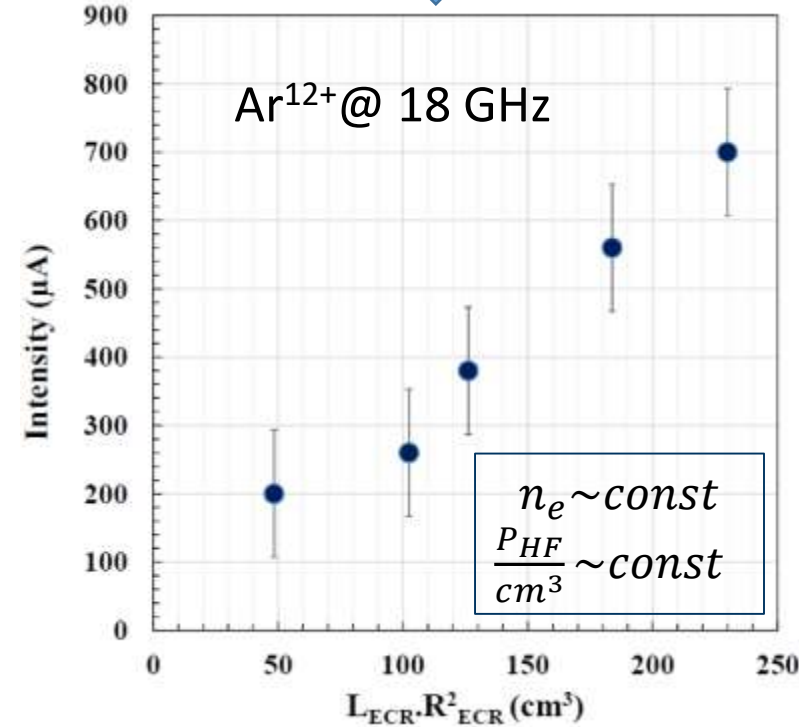


flux d'ions
proportionnel au
volume zone ECR
@ $f_{ecr}=28$ GHz

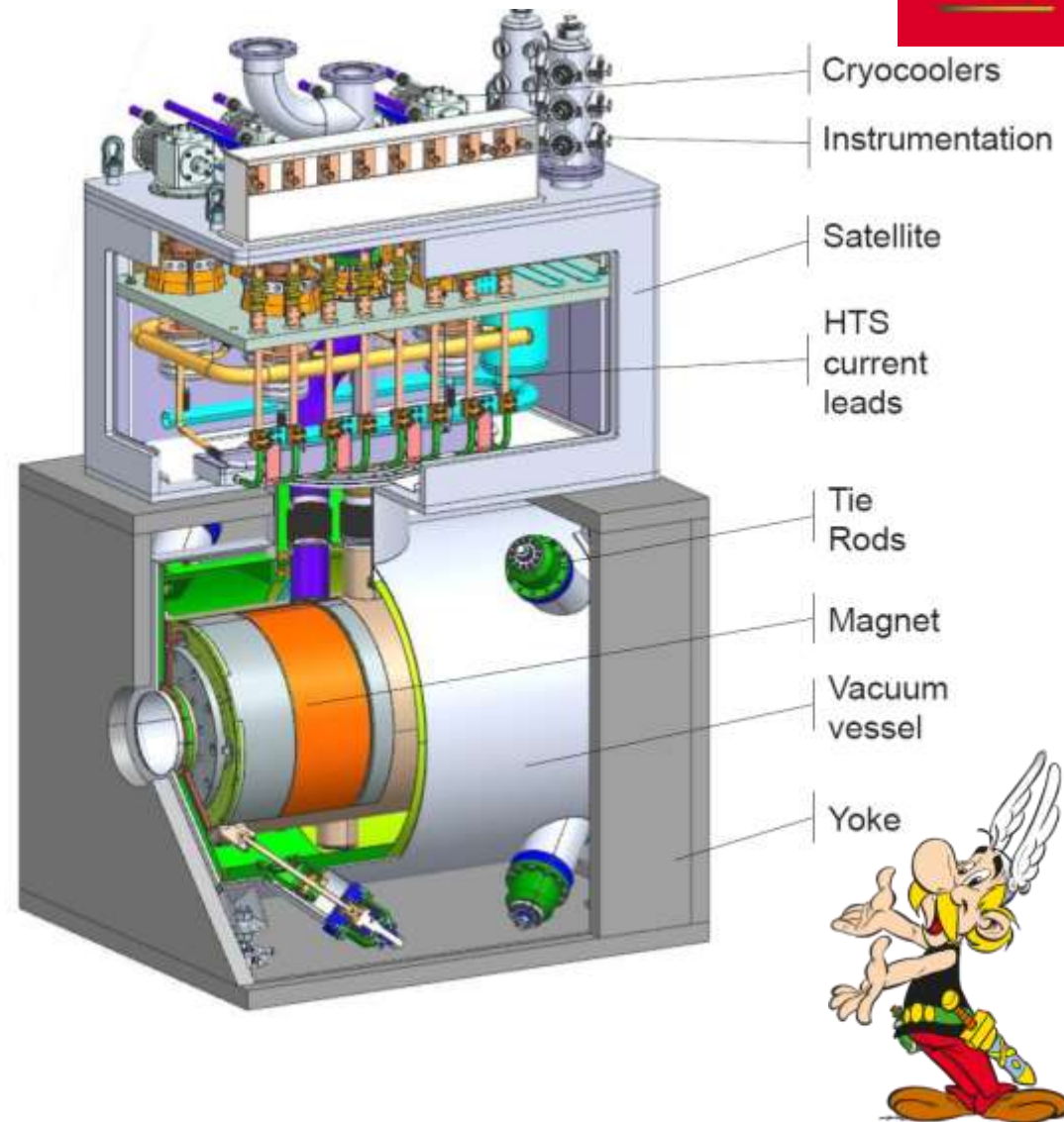
flux d'ions
proportionnel au
volume zone ECR
@ $f_{ecr}=18$ GHz

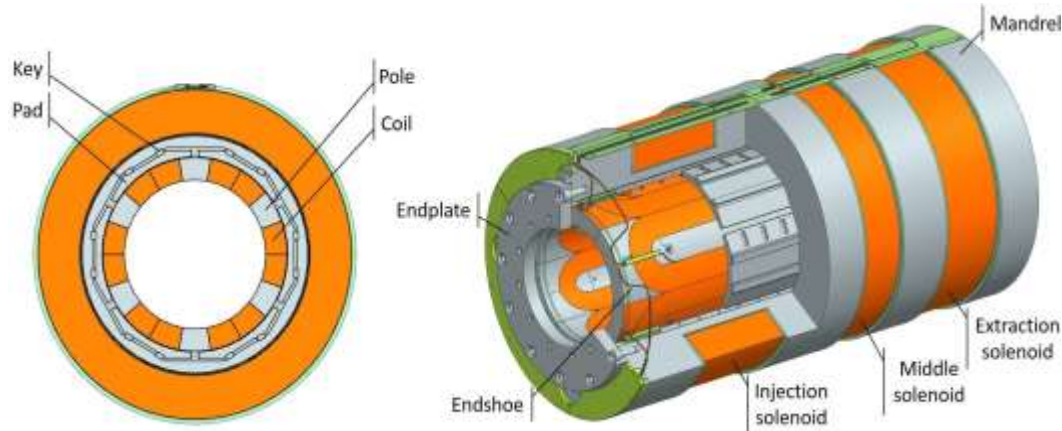


Choix de développer une
source d'ions @ 28 GHz
De grand volume

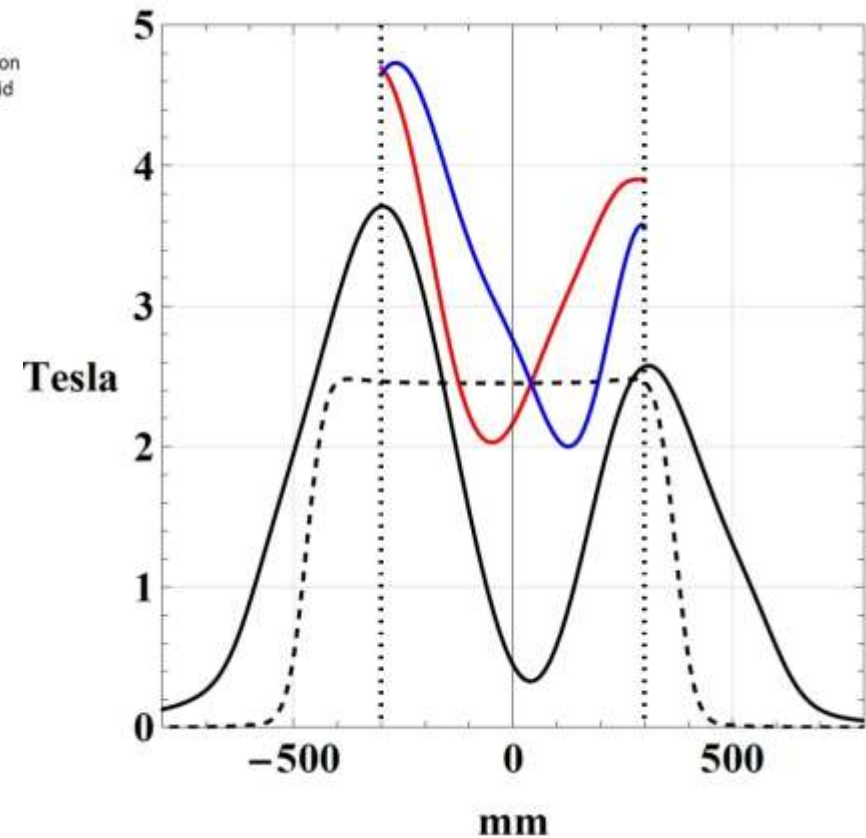


Parameter	Value	VS VENUS
ECR frequency	28 GHz	
Max Axial Mirror Peak Field	3.7 – 0.1 – 2.5 T	
Radial Peak Field	2.4 T	
Chamber length	600 mm	+20%
Chamber radius	91 mm	+20%
Chamber volume	15.6 liter	+100%
ECR Length @ Bmin=0.3 T	220 mm	+20%
ECR volume @ Bmin=0.3 T	1.9 liter	+66%
Cooling power@ 4.2 K	9 W	
SC Cable	NbTi	
Beam requirement #1	10 μA U^{34+}	
Beam requirement #2	15 μA Ni,Ti,Ca	

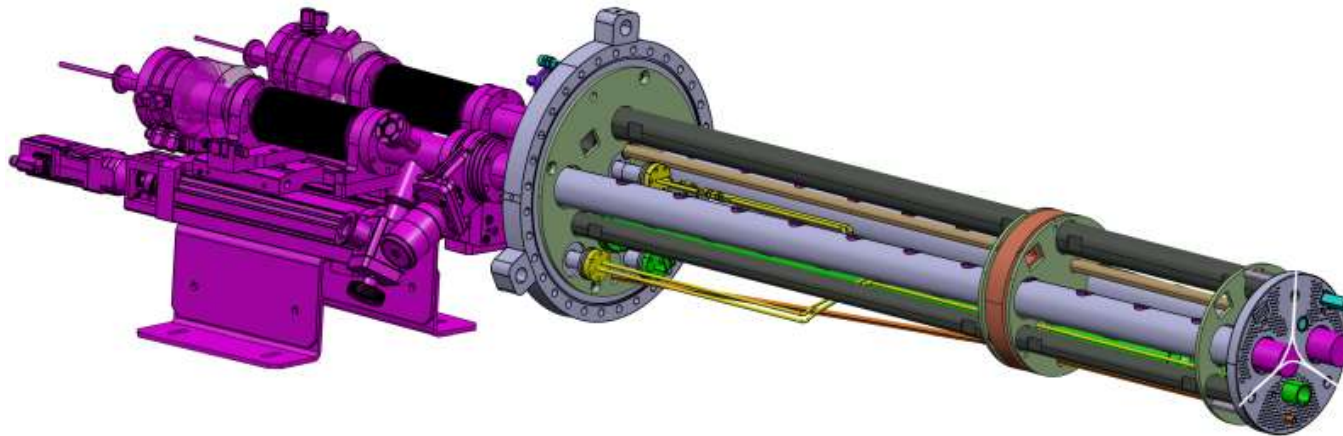
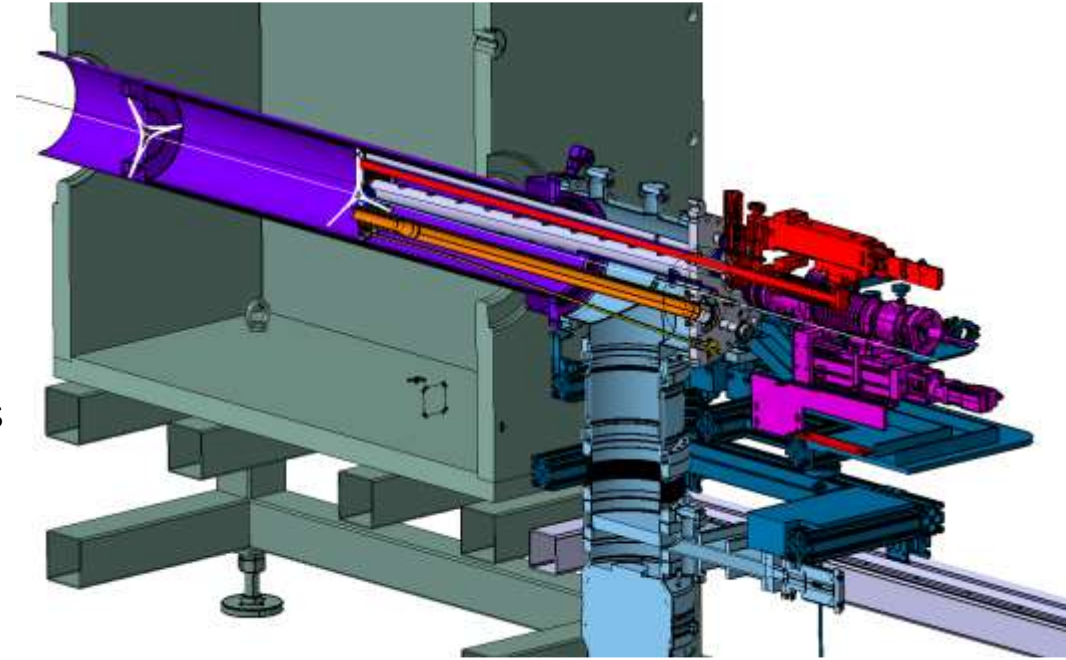




- ◆ Conception CEA Irfu / DACM
- ◆ Fabrication sous traitée à l'industrie
- ◆ $\text{Cos}3\theta$ hexapole magnet
- ◆ Technology « bladder and keys »
 - ◆ Adjustable pre-stress load
 - ◆ dismountable hexapolar coil
 - ◆ Construction Risk reduction
- ◆ Radial field $B_r \sim 2.45 \text{ T} @ r=91 \text{ mm}$
- ◆ Last closed magnetic surface at wall for 3.7-0.3-2.5 T is $|\mathbf{B}| \sim 2\text{T} (+10\% / \text{VENUS})$



- ◆ Réalisations LPSC/SERM
- ◆ Ens. Chambre plasma
 - ◆ Alliage alu, refroidie, soudure BE
 - ◆ Isolants HT, blindage X en Ta
- ◆ Ens. Injection
 - ◆ Ultra vide
 - ◆ 2 ports pour fours métalliques + motorisation + sas
 - ◆ 1 endoscope
 - ◆ 3 ports d'injection HF (14,18,28 GHz)
 - ◆ 1 bias disk (polarisation plasma)
 - ◆ 1 injection de gaz
 - ◆ 4x5 mm d'écran en tungstène (blindage X interne, une 1ere)



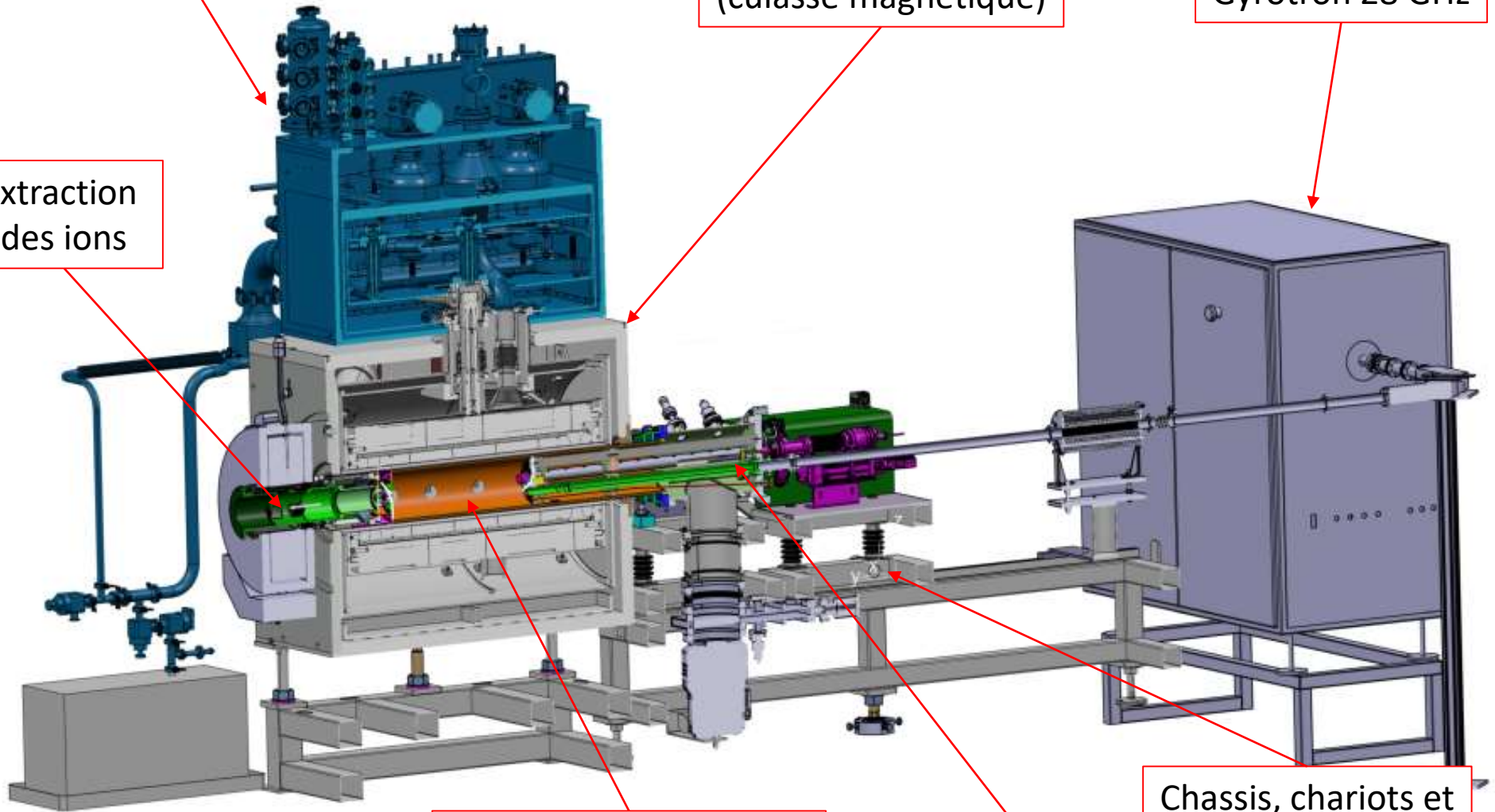
Ensemble source d'ions

Aimant, cryostat et satellite

Yoke
(culasse magnétique)

Émetteur
Gyrotron 28 GHz

Extraction
des ions

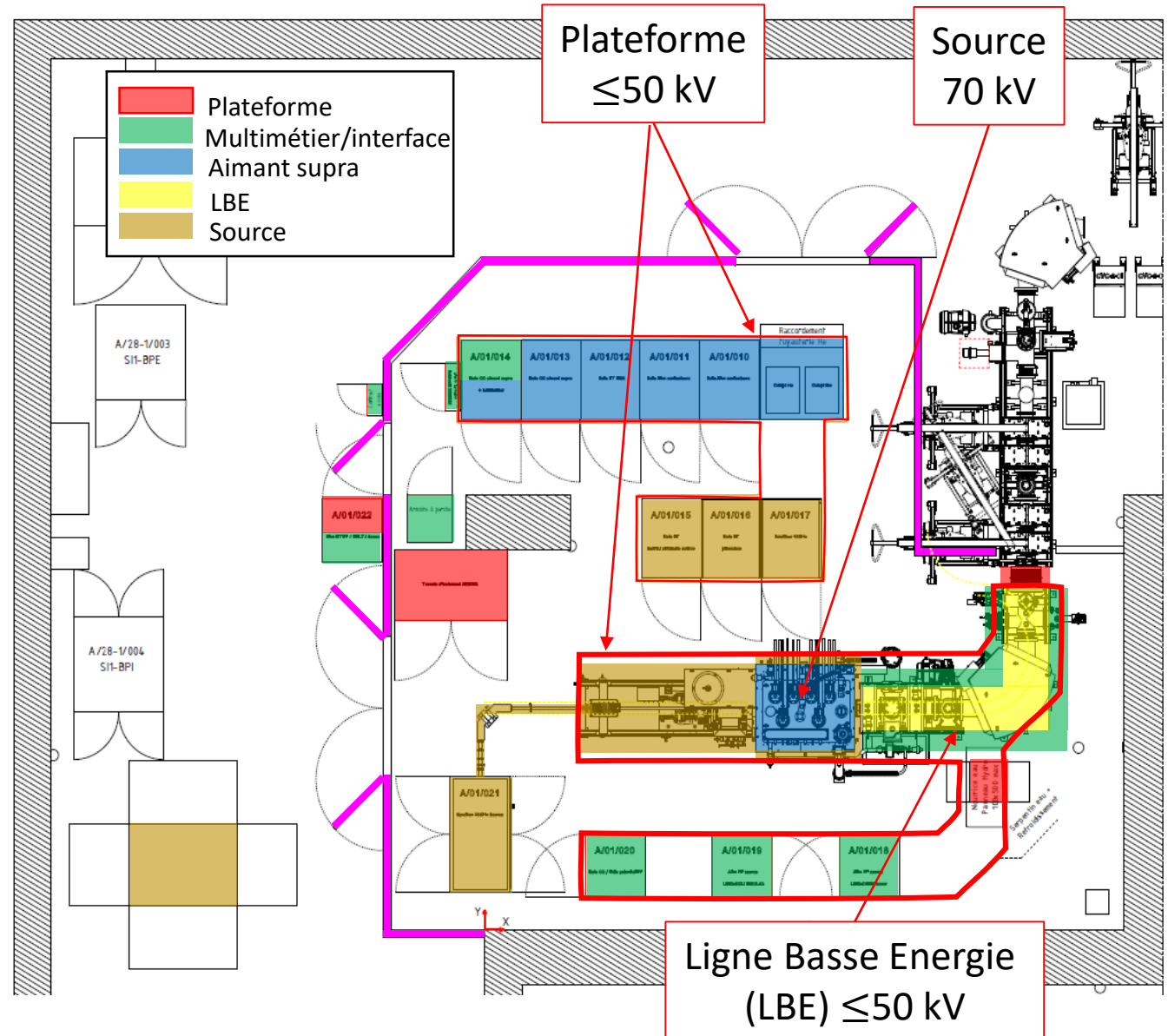


Ens. Chambre à plasma

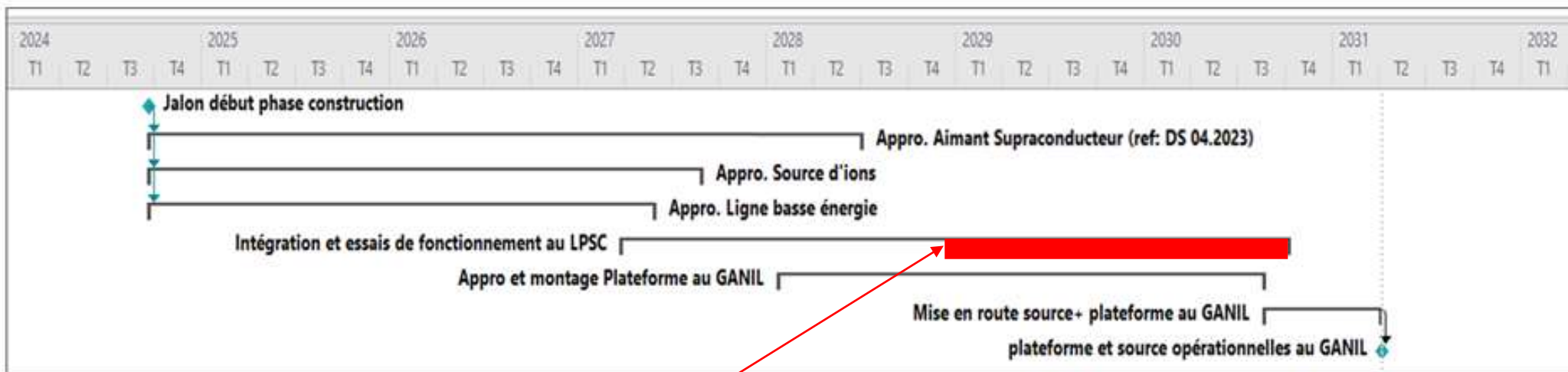
Ens. Injection

Chassis, chariots et
alignement

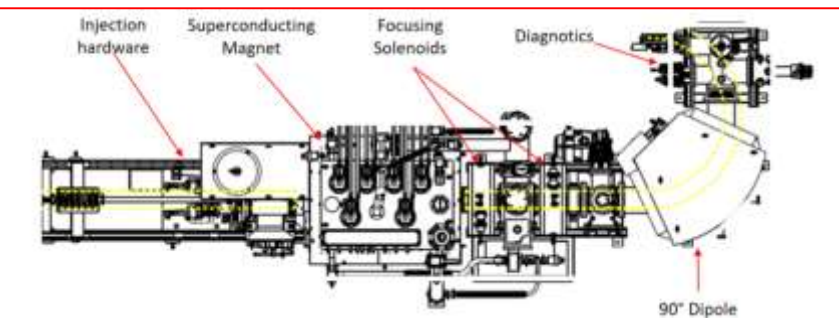
- ◆ Intégration complexe
 - ◆ salle déjà exploitée
- ◆ Nombreuses contraintes techniques
- ◆ implantation plateforme validée 09/24



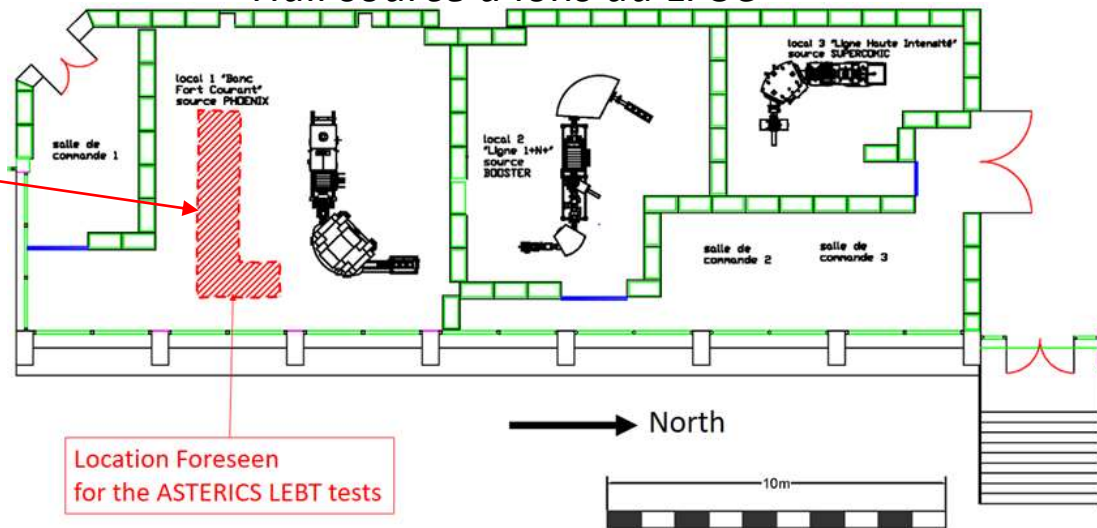
Planning



Qualification source et LBE au LPSC

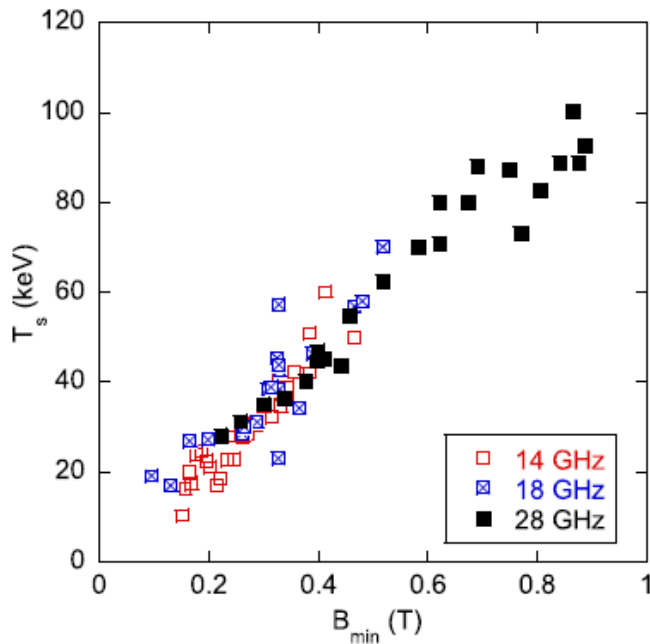


Hall source d'ions au LPSC

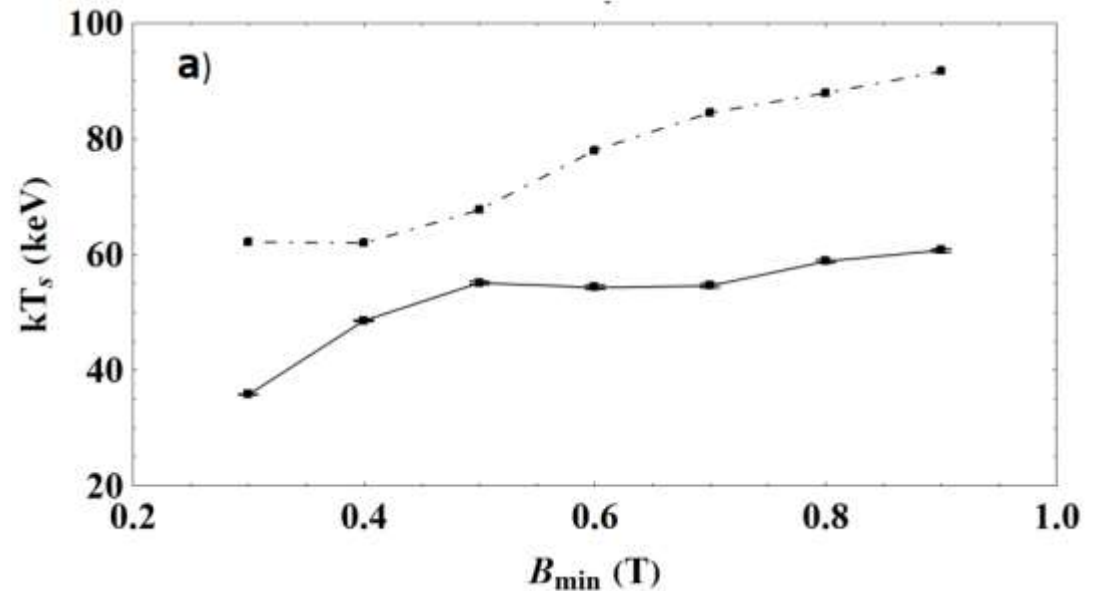


Location Foreseen for the ASTERIS LEBT tests

- ◇ Source d'ions au meilleur niveau mondial
- ◇ Développement unique en Europe
- ◇ Performances d'ASTERICS très attendues à l'international
- ◇ Collaboration nationale enrichissante
- ◇ A ce jour: Communications en conférence (x4) et 1 projet de publication (x1 à soumettre)



Benitez et al. (2017),
IEEE transaction on Plasma Science.



A. Cernuschi and T. Thuillier, NEWGAIN, papier de simulation à soumettre

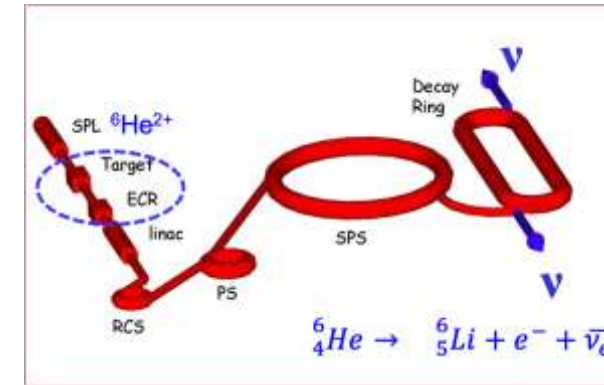
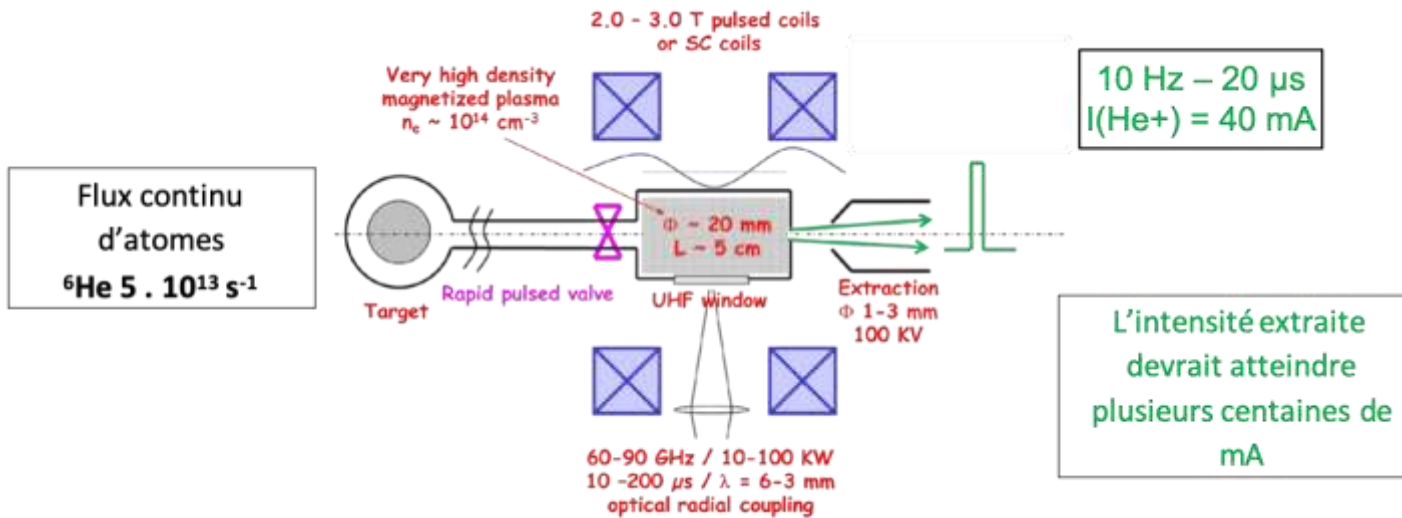


Source 60 GHz

Thomas André

Source 60GHz - Contexte

- ◆ Conception du premier prototype de source ECR 60 GHz
- ◆ Idée initiale (pour Beta Beams)
- ◆ Perspectives d'évolution: faisceaux stables intenses pulsés puis continus

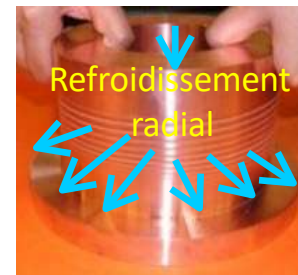


Etudes de faisabilité avec la technologie des polyhélices en collaboration avec le LNCMI :

- ◆ Technologie à haute résistance aux rayonnements
- ◆ « Peu couteuse » pour et « jetable » à cause des ions radioactifs
- ◆ Ultra compact
 - ◆ Efficacité du bunching des paquets d'ions
 - ◆ Réduire la consommation de courant totale



Densité de courant variable



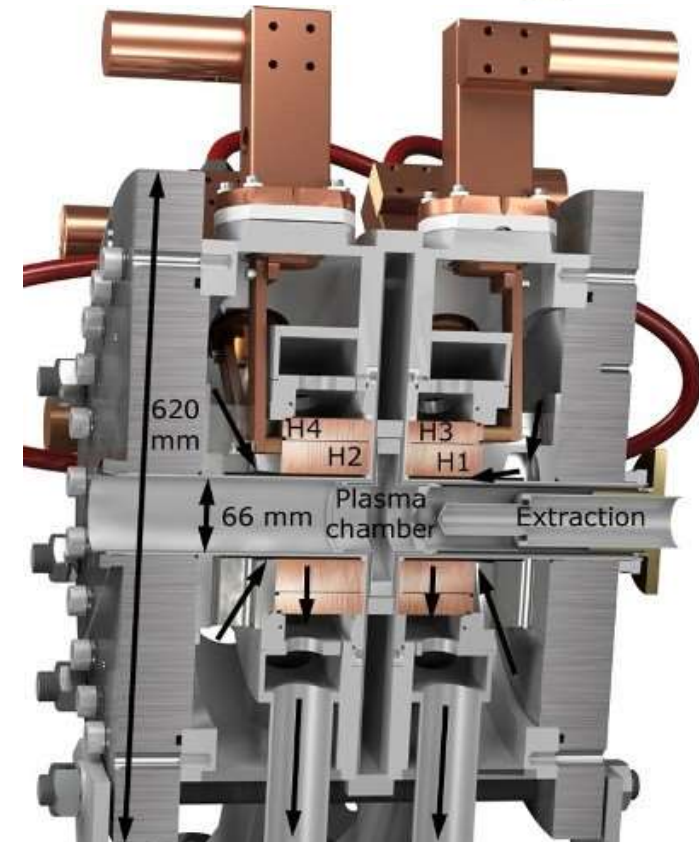
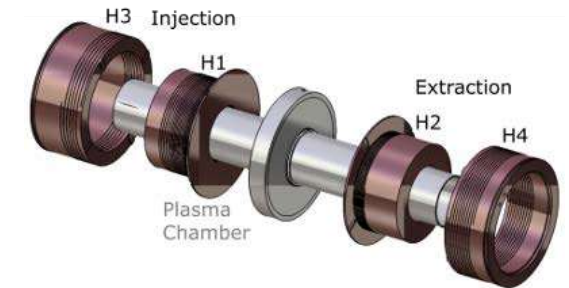
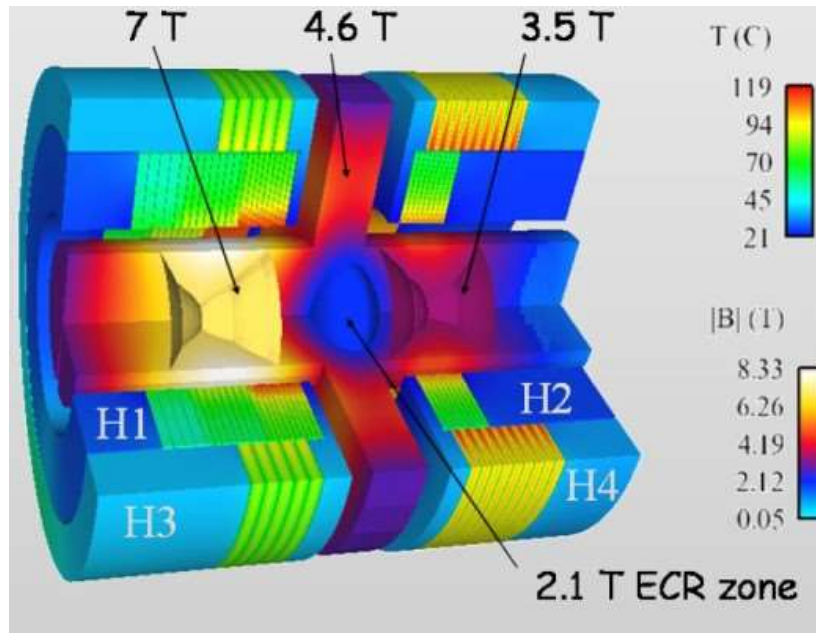
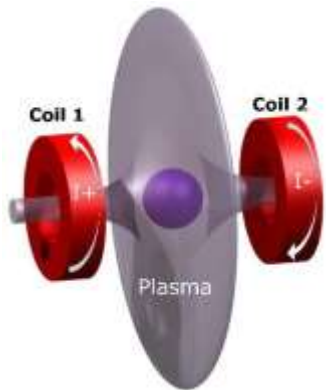
- ◆ **SEISM** : **S**ixty gigahertz **I**on **S**ource using **M**egawatt magnets.
- ◆ Prototype unique au monde, fréquence RCE la plus élevée **60 GHz**.
- ◆ Génération du champ magnétique par des bobines résistives construites avec le LNCMI, où l'expérience est installée, pour bénéficier des amenées de courant 26000 A et refroidissement (40 l/s à 17 bars)
- ◆ Pour la production de micro-ondes, un Gyrotron, une ligne de transport, une injection optique dans la source fournie par IAP RAS Nizhny Novgorod 60 GHz / 300 kW / 1 ms pulses / 2 Hz.
- ◆ Premières expériences réalisées en 2014 mais arrêtée à cause d'un court circuit qui a détruit 2 bobines (circuit de refroidissement).
- ◆ Le projet a redémarré en 2019 avec de nouveaux fonds de l'IN2P3.



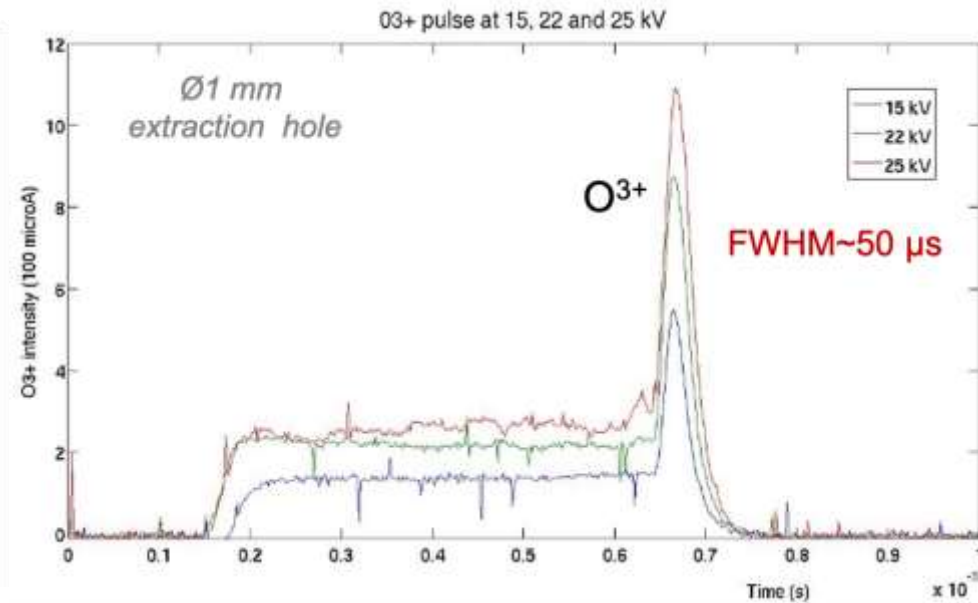
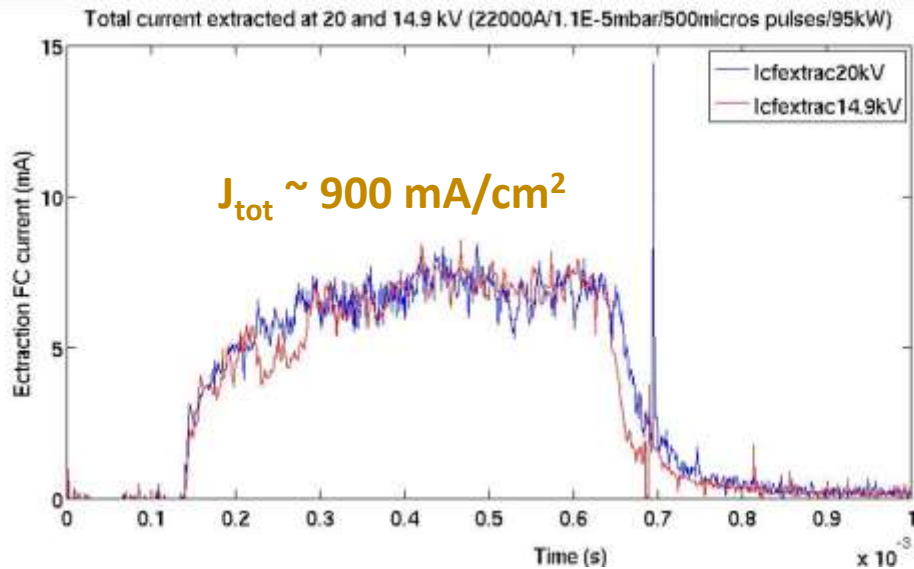
◆ Simulation 3D et conception CAO

◆ Spécifications magnétiques du prototype:

- ◆ Configuration magnétique simple (cusp)
- ◆ Surface de résonance ECR 60 GHz (2.14 T) fermée
- ◆ Valeurs de B : 6T injection, 3T extraction, 4T radial
- ◆ Faible volume magnétisé (de 0,5 à 1 litre); forts gradients magnétiques
- ◆ La zone ECR est fermée et ne touche pas les parois







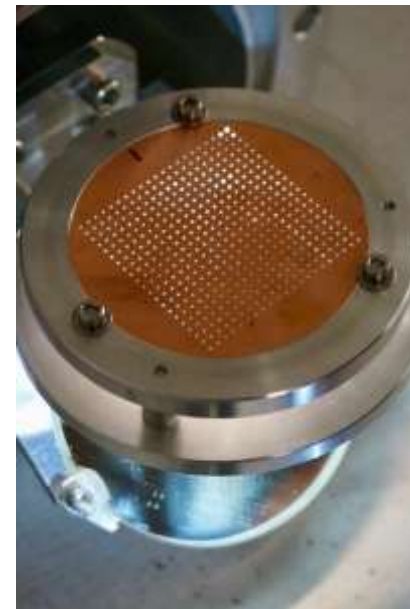
- ◆ Électrode d'extraction de 1 mm de diamètre
- ◆ Observation de densité de courant jusqu'à 900 mA/cm² (Oxygène)

- ◆ Observation de pics d'afterglow
- ◆ Démonstration d'un confinement des ions dans un CUSP RCE!

Densité de courant extraite 10x supérieure aux sources actuelles

Objectifs techniques :

- ◆ Bilan des mesures de 2014 → mise à niveau et installation d'une nouvelle ligne expérimentale :
 - ◆ Simulation Tracewin pour définir la nouvelle ligne : utilisation d'éléments disponible au LPSC :
 - ◆ Triplet de quadrupôle pour assurer la focalisation du faisceau
 - ◆ Dipôle de plus grande acceptance (gap 90 mm contre 60 mm)
 - ◆ Amélioration du vide résiduel
 - ◆ Achat d'un pont roulant pour optimiser l'implantation dans la salle LNCMI
 - ◆ Reconstruction des bobines endommagées en 2014
 - ◆ Redémarrage du système gyrotron sans l'expertise des collègues russes
 - ◆ Développement d'un diagnostic faisceau pour la mesure d'émittance pepperpot

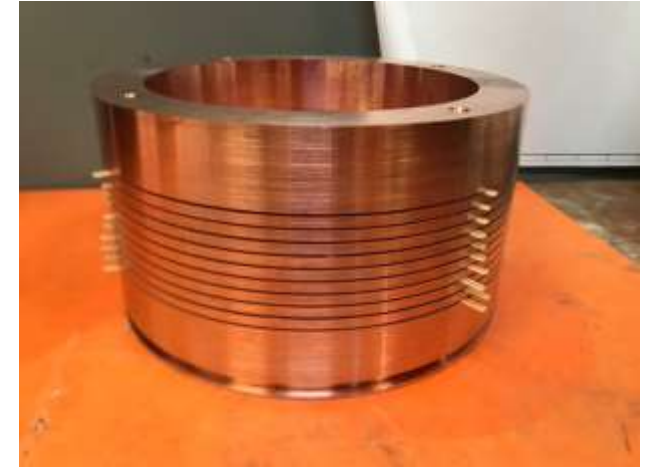


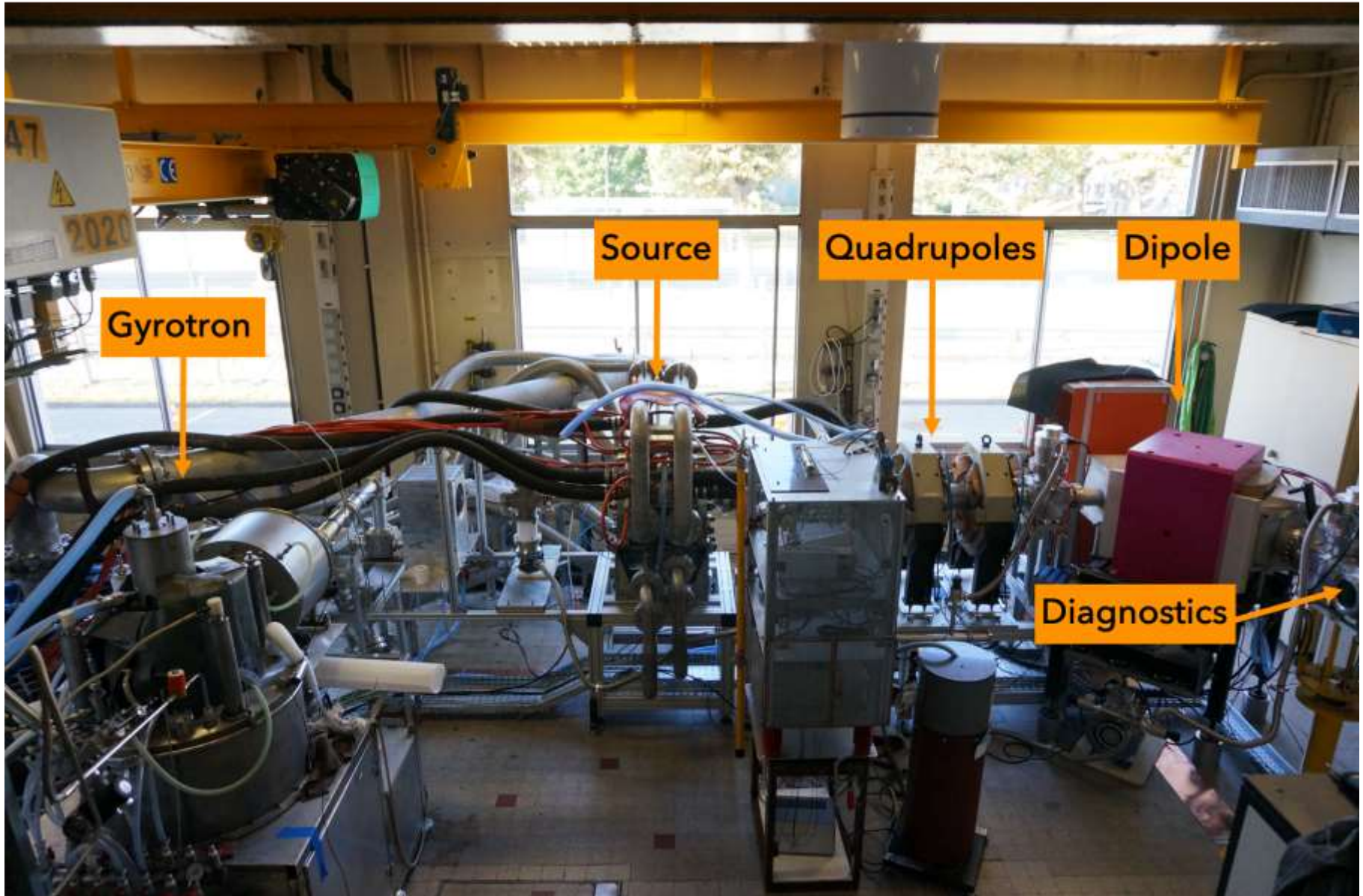
pepperpot

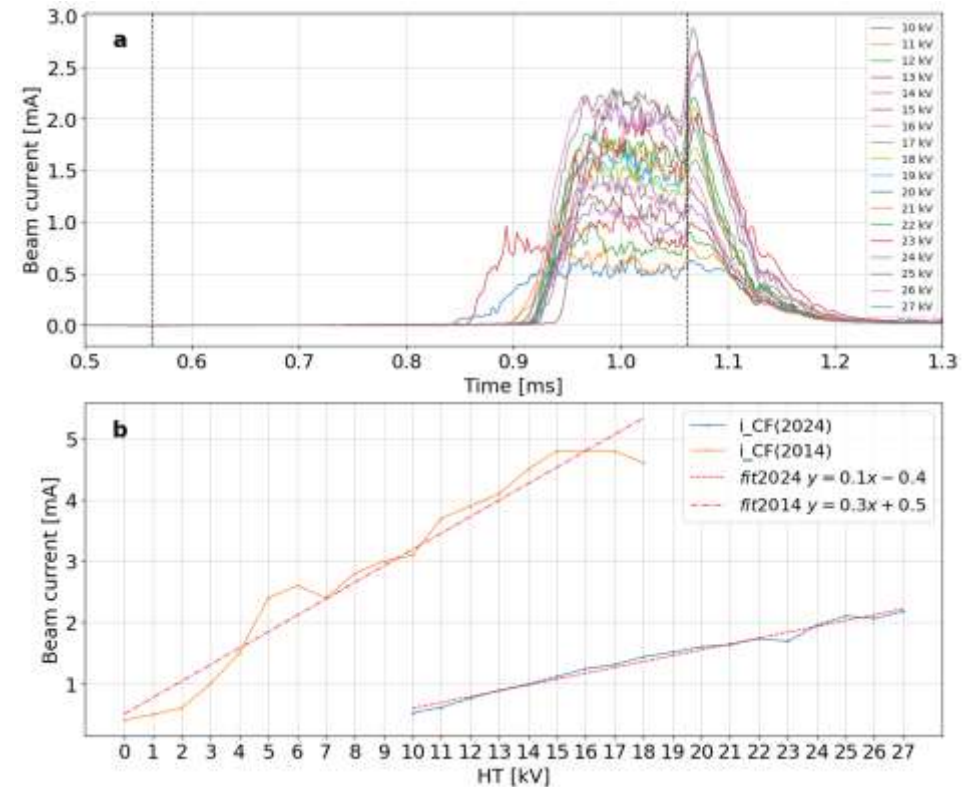
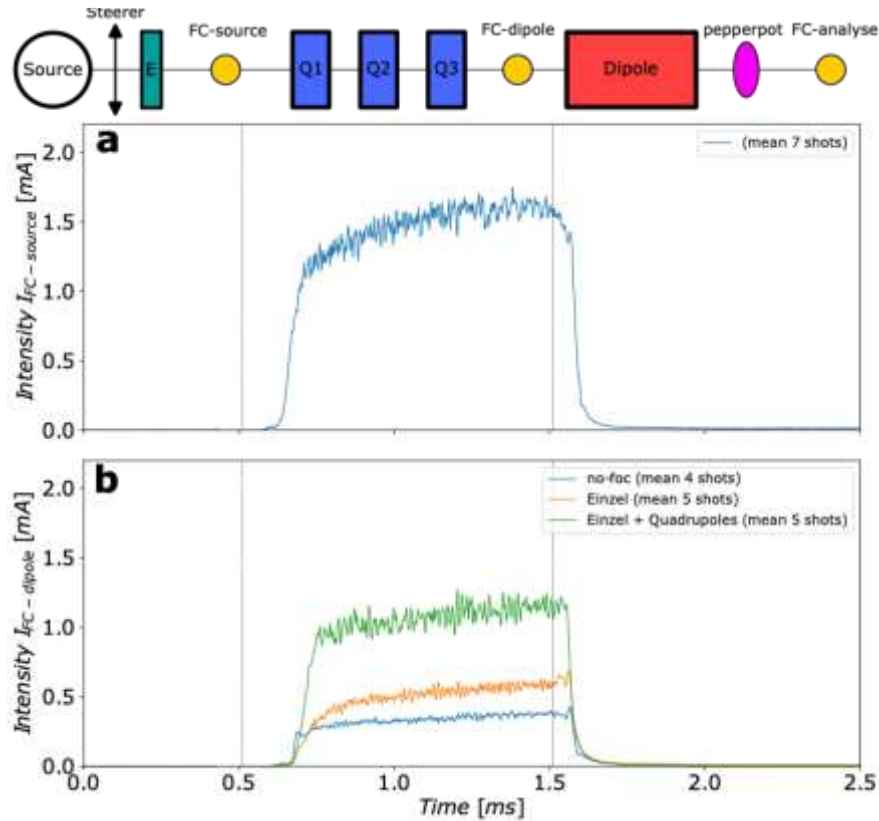
Objectifs scientifiques :

- ◆ Reproduire les résultats obtenus en 2014
- ◆ Caractériser le fonctionnement de la source en fonction des réglages disponible :
 - ◆ champ magnétique
 - ◆ haute tension
 - ◆ pression de gaz
 - ◆ puissance HF
- ◆ Qualifier la qualité du faisceau par une mesure d'emittance

Source 60GHz – Reconstruction bobines – Cold spray







- ◆ Amélioration du vide résiduel : $10^{-6} \rightarrow 10^{-7}$ mbars
- ◆ Installation d'éléments de focalisation (Einzel + quadrupôles)
- ◆ Transmission passe de 20% à **75%** (augmentation de 300%)

- ◆ Électrode d'extraction de 1 mm de diamètre
- ◆ Etude intensité courant extrait vs haute tension extraction :
 - ◆ 100 $\mu\text{A}/\text{kV}$ en 2024 pour 300 $\mu\text{A}/\text{kV}$ en 2014
 - ◆ Analyse => **compensation de charge d'espace 3x plus faible en 2024**

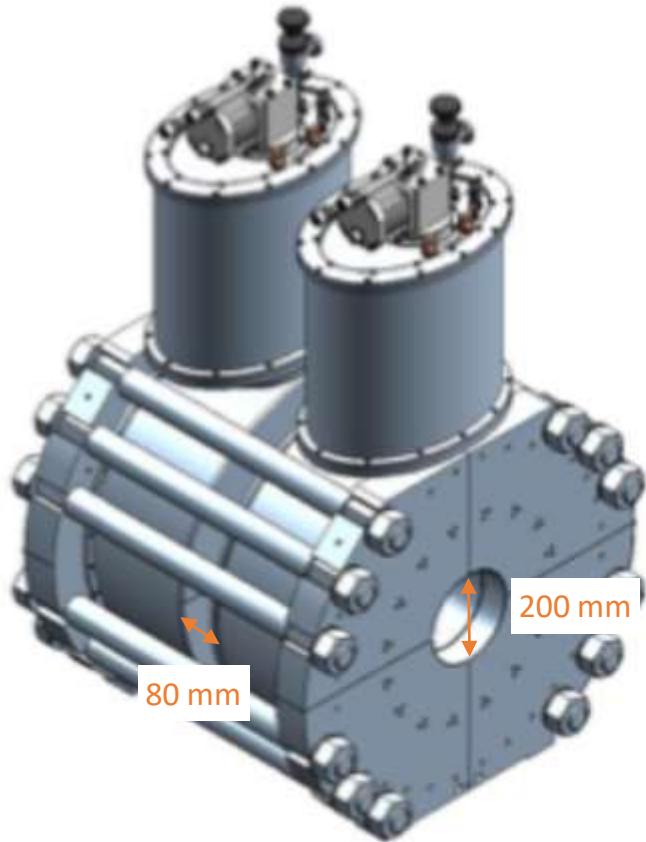
EQUIPEX + PACIFICS :

- ◆ Programme de recherche commun CEA / IN2P3 financé par l'ANR en 2020
- ◆ WP4 dédié à la R&D des sources d'ions → développement des faisceaux de haute intensité pour les accélérateurs du futurs
 - ◆ Remplacer les bobines résistives par des supraconductrices → Rapatrier la source au LPSC
 - ◆ Améliorer les alimentations du gyrotron 60 GHz pour obtenir 20 kW – CW (contre 300 kW/1 ms/1 Hz)
 - ◆ Développer un nouveau système d'extraction de faisceau d'ions de haute intensité

Objectifs :

- ◆ Produire >100 mA de faisceau d'ions lourds multichargés en continu
- ◆ Etudier les plasmas RCE à 60 GHz avec des diagnostics
- ◆ Etudier l'emittance du faisceau et la compensation de charge d'espace

Nouvelle source en cours de construction:



- ◆ Fabrication par Scientific Magnetics (UK)
- ◆ Conception avec deux cryostats
- ◆ Multiples configurations magnétiques: CUSP ou miroir
- ◆ Grand diamètre de chambre à plasma 200 mm
- ◆ Large espace inter-cryostats 80 mm :
 - ◆ 4 ports de visée vers la chambre à plasma
 - ◆ installation de diagnostics plasma (discussions avec INFN Catane)

Mise à niveau gyrotron 60GHz :

- ◆ Nouvelle alimentations hautes tensions pour passage en continue 20 kW (TECHNIX)
- ◆ Mise à niveau du cryostat → achat d'un reliquéfacteur



Booster de Charge

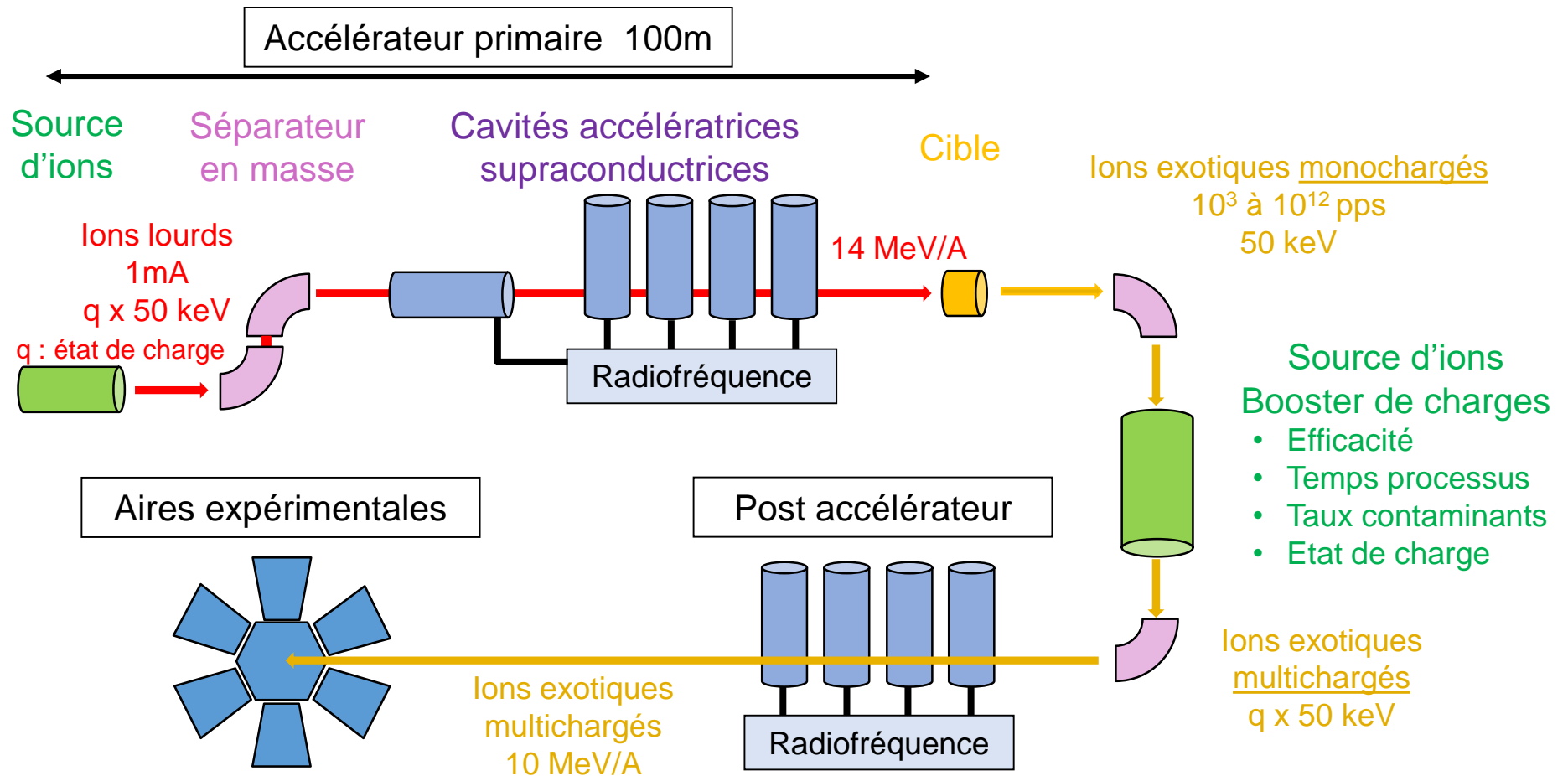
Julien Angot

Introduction

Contexte : développement de faisceaux radioactifs (RIB) au GANIL (Fr), SPES (Italie), TRIUMF (Canada)...

Méthode Isotope Separation On Line (ISOL) → réaccélération des RIBs produits

→ Fortes exigences sur les performances



Lab Facility	Prim. beam	Reaction Ionisation source	Charge Breeder I+ (pps)	Post accel. Energy
ANL CARIBU		²⁵² Cf fission fragments He gas catcher	ECRIS → EBIS	SC LINAC 10 MeV/u
CERN ISOLDE	1.4 GeV p ⁺	Spallation, fragmentation, fission Surface, laser, plasma, LIST	EBIS 10 ⁷	LINAC + SC LINAC 10.4 MeV/u at A/q=2.5
GANIL SPIRAL1	95 MeV/u C 24 MeV/u U	Fragmetation, fusion evaporation ECR, Febiad	ECRIS 10 ² to 5 × 10 ⁸	Cyclotron Up to 25 MeV/u
LNL SPES	30-70 MeV 1.5 mA H ⁺	UCx target fragmentation	ECRIS 10 ⁶	RFQ, SC LINAC Up to 10 MeV/u for A/q=7
MSU ReA	80 MeV/u	Projectile fragmentation He gas catcher	EBIT CW 10 ¹⁰	RFQ, SC LINAC 20 MeV/u light, 12 MeV/u heavy
Texas A&M	80 MeV H ⁺	(p,n) reactions He gas cell	ECRIS	Cyclotron 26-57 MeV/u
TRIUMF ISAC	500 MeV H ⁺	Spallation, fragmentation Surface, laser, plasma	ECRIS+EBIS 10 ⁵ to 10 ⁹	RFQ, LINAC, SC LINAC 0.15-9.5 MeV/u
IBS RAON	70 MeV p ⁺	UCx target fragmentation	EBIS Up to 10 ⁹	SC LINAC 20 MeV/u

- ❖ Augmentation des taux de production (MSU, GANIL SPIRAL2 Ph2 ..)
- ❖ Amélioration de la pureté des signaux pour les faibles taux de production

Le pôle développe le Booster ECR de type PHOENIX

Différentes versions installées au GANIL (Fr), LNL (Italie), TRIUMF (Canada)

Pôle porteur de projets avec :

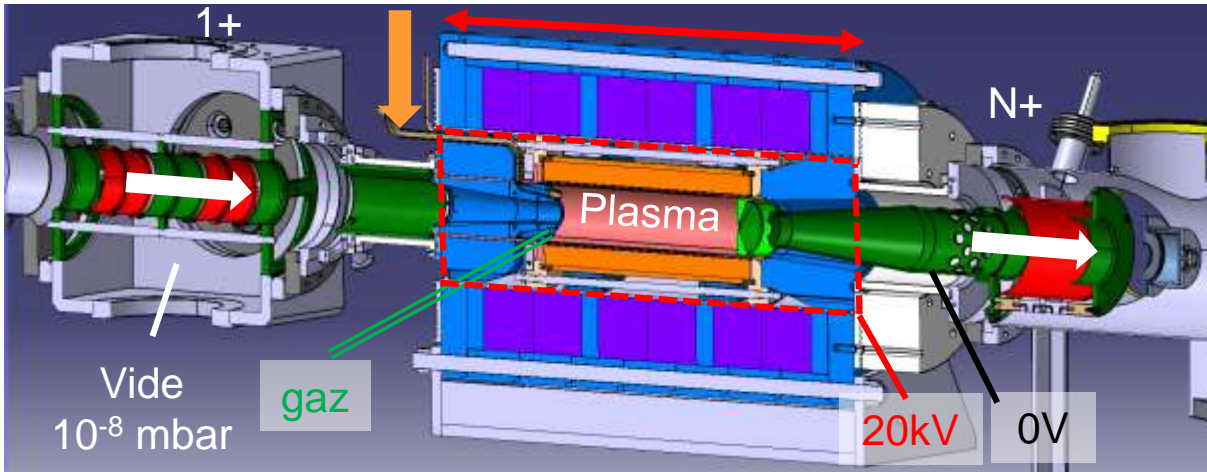
- ◆ GANIL, projet IN2P3 « Charge breeding » du master projet « ions radioactifs », 2021 – 2025
- ◆ LNL, 2 contrats de collaboration et de recherche:
 - ◆ fabrication Booster (2014 - 2016)
 - ◆ réduction des contaminants (2018 - 2024)

Source de R&D au LPSC : 14.5 GHz

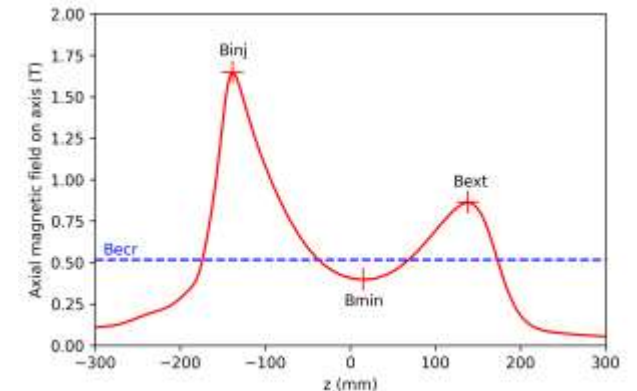
Onde Hyperfréquence

500 – 600W

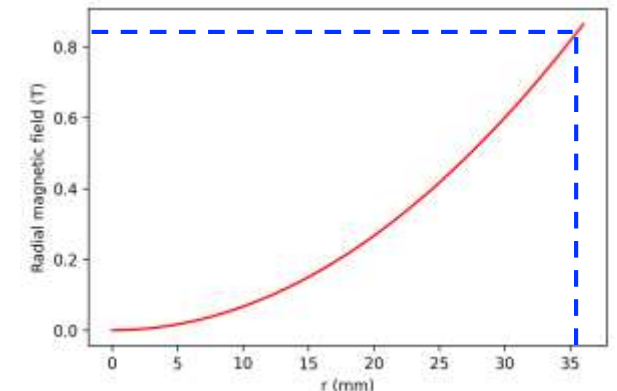
600 mm



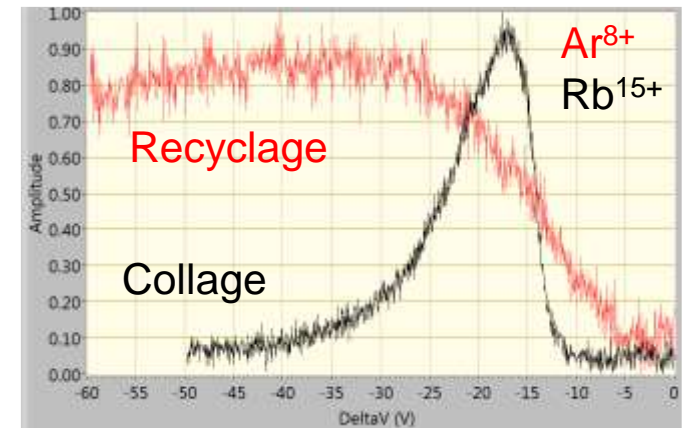
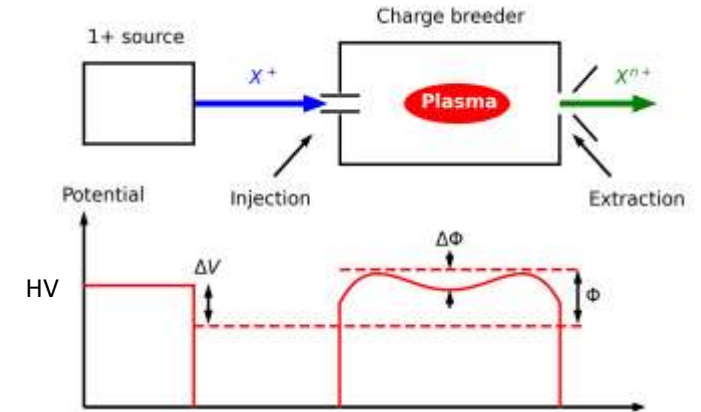
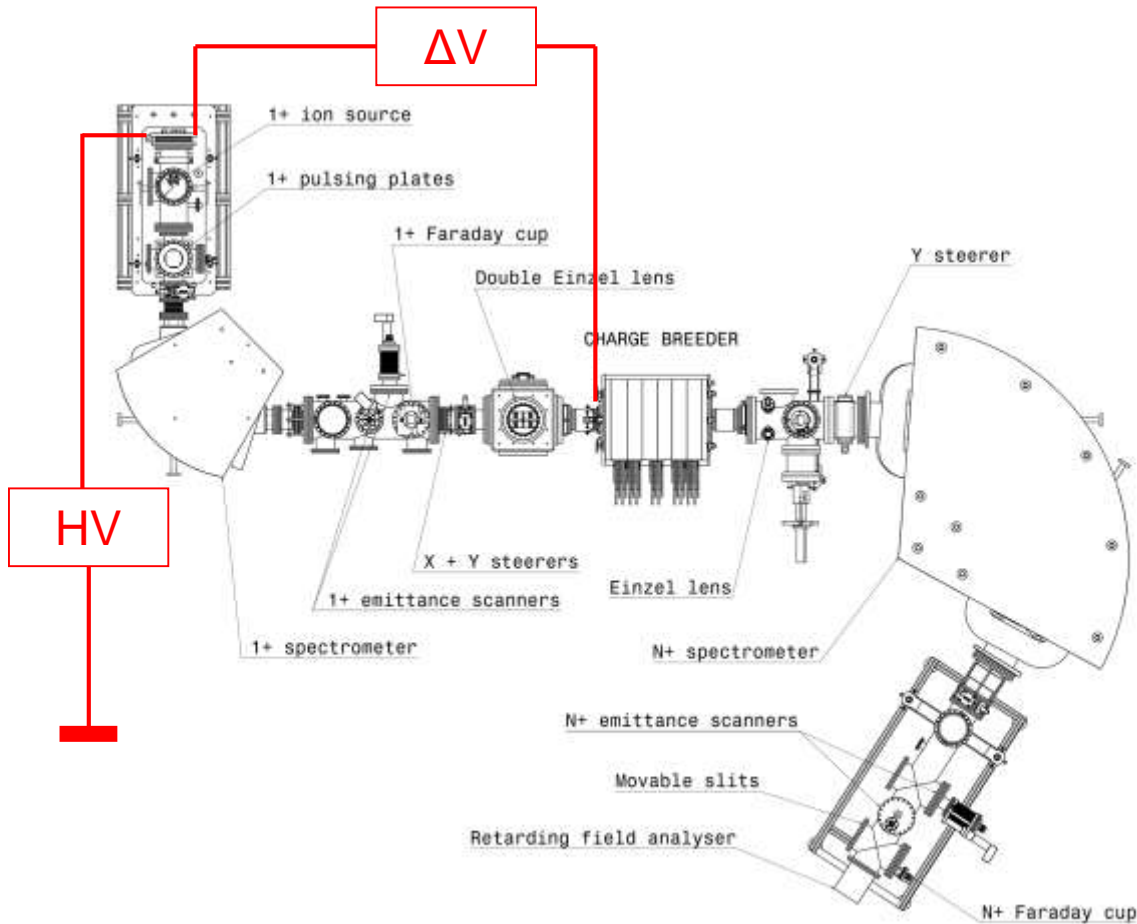
Champ magnétique axial



Champ magnétique radial



Banc 1+N+ : qualification du Booster en ions stables



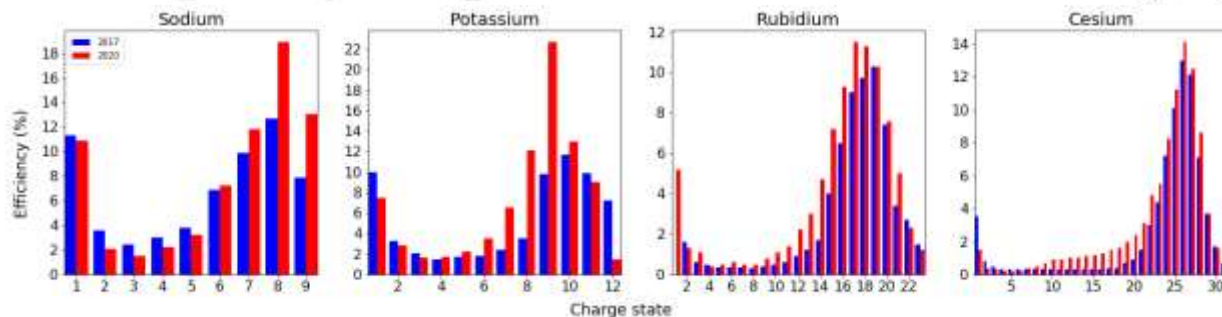
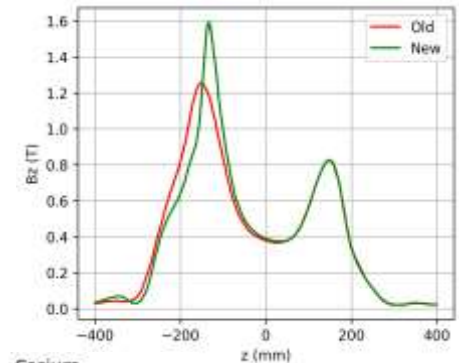
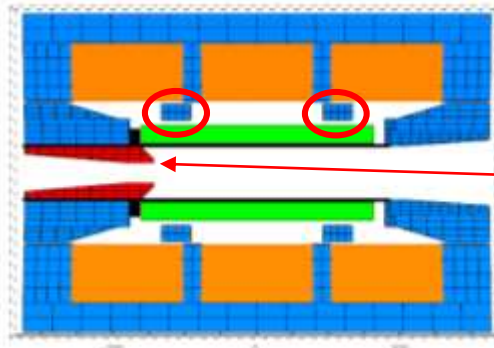
Objectif : améliorer les performances de la source pour les sources en opération

Stratégie scientifique : 3 phases pour le Booster du LPSC

1. Améliorer les efficacités (2016 – 2022)
2. Faciliter le réglage, réduire les contaminants (2022 – 2024)
3. Atteindre de plus hauts états de charges, réduire les contaminants (Depuis 07/2024)

Etape 1 : améliorer les efficacités (2016 – 2022)

- ❖ Jouvence de la ligne 1+N+ pour améliorer le vide et l’alignement (2018 – 2019)
- ❖ Modification de la configuration magnétique du Booster de charges pour améliorer le confinement



Efficacités
5 – 12 %
↓
10 – 20%

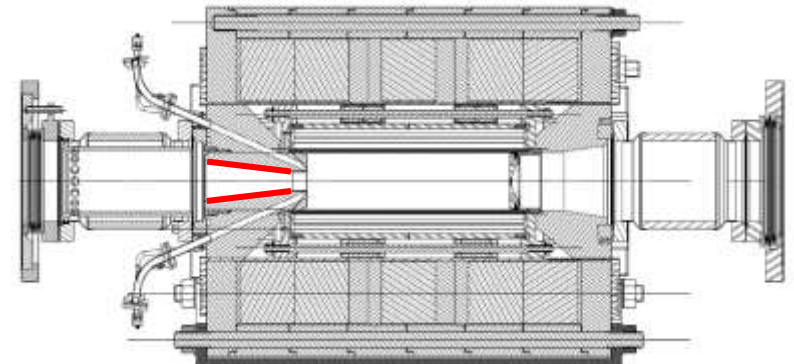
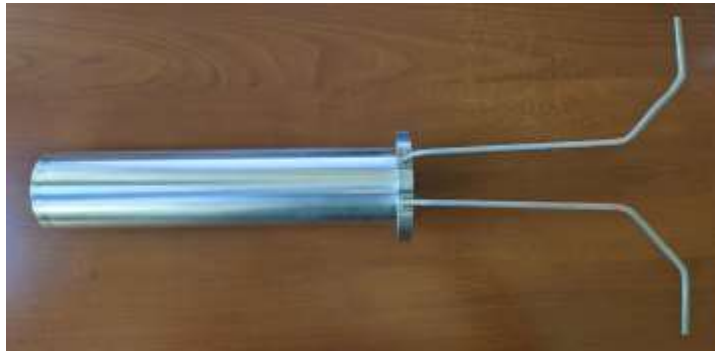
Etape 2 : faciliter le réglage, réduire les contaminants (2022 – 2024)

- Modification de la configuration en « 5 bobines »
- Etude de la réduction des contaminants

➔ contrat de collaboration et de Recherche SPES2 (2018 – 2024, 111k€), LPSC – LNL

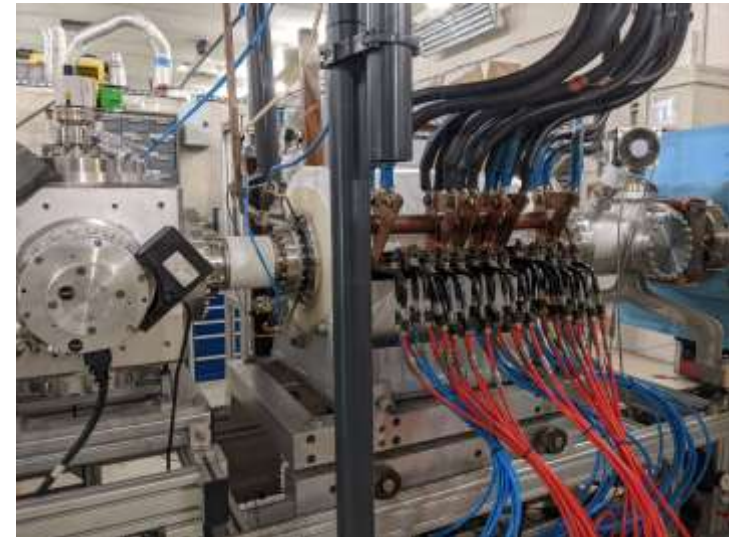
- ◇ Fabrication d'une nouvelle chambre à plasma en aluminium + chemisages
- ◇ Etude de l'utilisation de chemisages en matériau de haute pureté (Nb ...)
- Amélioration des instruments de mesure du banc 1+N+ (spectromètre de masse, détecteur channeltron ..)
- Expérimentations : Identification de surfaces contribuant à la contamination (pulvérisation)

➤ Problème de chambre à plasma ➔ étape 3

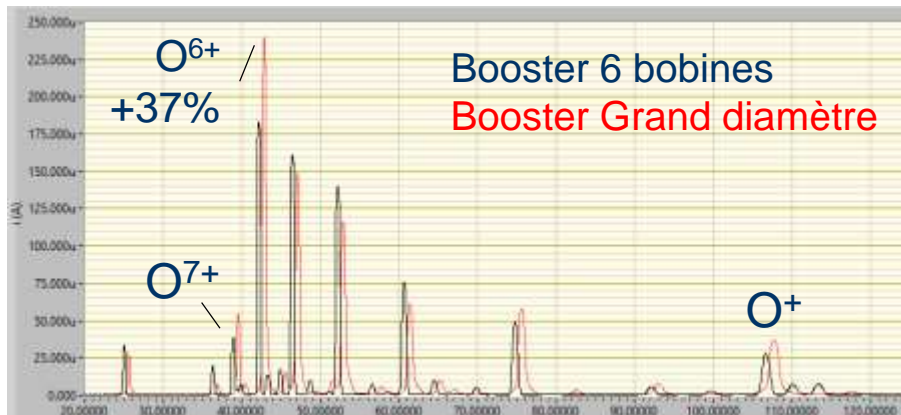


Etape 3 : atteindre de plus hauts états de charges, réduire les contaminants (depuis 07/2024)

- ◇ Modification de la configuration en « Grand diamètre » pour augmenter le volume du plasma
- ◇ Conception révisée (suppression des joints plastique, double peau..)
- Montage de la source, mesures de vérification, montage sur la ligne
- Essais préliminaires en source seule avec Oxygène 07/2024



Spectre d'Oxygène, résultats préliminaires



- Augmentation des intensités à haut état de charge
- Plus hauts états de charge produits
- Distribution plus « piquée » sur un état de charge
- Diminutions contaminants gazeux

2017 04 05 – 14 54 11, 2024 10 11 – 11 46 08

Etudes du plasma, collaboration internationale avec 4 laboratoires (Italie, Finlande, UK, GANIL)

Origine : Call NupNet - Emilie (2013)

Objectifs :

Améliorer les connaissances :

- ◆ Des plasmas ECR
- ◆ De la capture du faisceau 1+ dans la méthode « charge breeding »

Organisation :

Environ 1 campagne expérimentale par an au LPSC:

- ◆ Elaboration
- ◆ Développement instruments + adaptation du banc
- ◆ Expérimentations
- ◆ Analyse + simulations
- ◆ Publication

Campagnes intercalées dans le programme de R&D instrument

Injection en mode pulsé

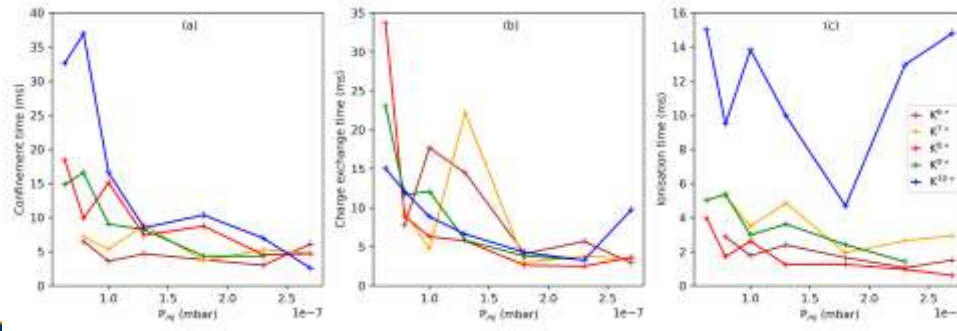
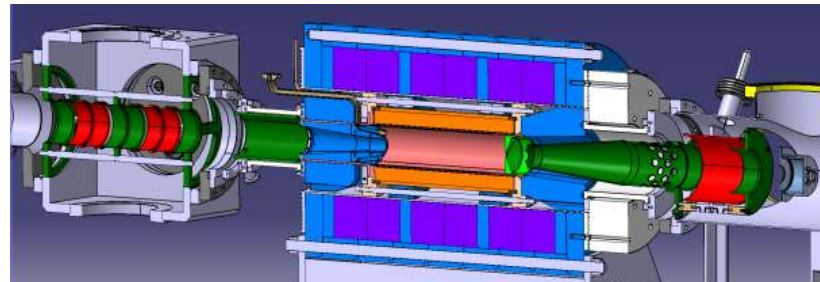
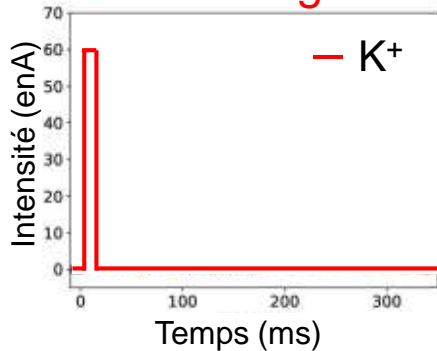
Etude du temps de processus : expérimentations (2018)

- ◆ Perturbation du plasma
- ◆ Estimation des efficacités pour les ions exotiques

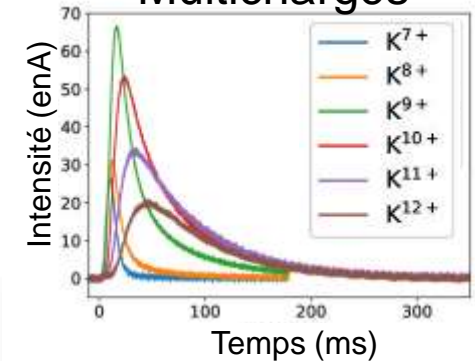
Estimation de grandeurs du plasma (n_e , T_e , temps caractéristiques) : expérimentations + simulations 0D

- ◆ Développement de la méthode initiale (2021)
- ◆ Double injection $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ pour réduire les barres d'erreur (2022)
- ◆ Influence de la distribution en énergie des e^- et des incertitudes des sections efficaces (2023)
- ◆ Influence des paramètres source (P_{hf} , gaz, B_{min} ..) sur les temps caractéristiques (2024)

Monochargés



Multichargés



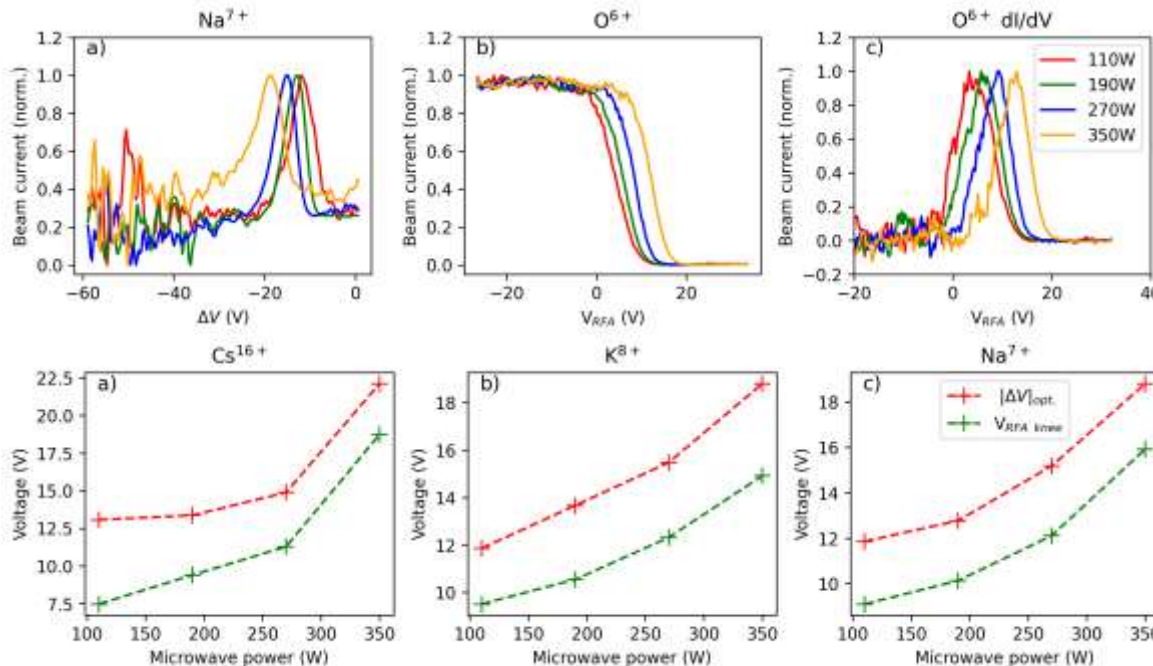
Capture du faisceau 1+ : mieux comprendre pour augmenter les efficacités

Dispersion en énergie des ions extraits : estimation du potentiel plasma (2023)

- ◆ Développement d'un « Retarding Potential Analyser »
- ◆ Forte influence du champ électrostatique

Capture du faisceau 1+ (2 campagnes)

- ◆ Etude préliminaire (rapport de masses) (2022)
 - ◆ Etude paramétrique : variation du potentiel plasma avec P_{HF} (2024)
- ➔ Capture du faisceau 1+ essentiellement due au freinage électrostatique



$$|\Delta V|_{opt} = \frac{4m_{1+}}{\pi m_i} \frac{kT_i}{e} + V_p$$

Collisions
Coulombiennes

Freinage
électrostatique

Bilan

Amélioration des performances (projets IN2P3 + contrats de collaboration et de recherche)

- ◆ Efficacités
- ◆ Contamination
- ➔ Impact sur les installations GANIL TRIUMF LNL

Amélioration des connaissances (plasma ECR et capture faisceau injecté)

Développement de nouveaux diagnostics

Perspectives

- ◆ Réduction des contaminants pour expérimentations au GANIL (horizon 2029, détecteur AGATA)
➔ Nouveau projet IN2P3
- ◆ LNL SPES : modification de la source pour qualifier le post accélérateur (mode source seule)
- ◆ Etudes du plasma ECR (capture, mode pulsé, ajout de diagnostics en collab. avec groupe plasmas)



Conclusion

- Conservation de l'héritage historique fort dans le domaine des sources RCE à Grenoble
- L'activité source d'ions est justifiée par un contexte/besoin de R&D nationale et internationale
- Le groupe a un atout : être dédié à la R&D, ce qui est unique en Europe (les autres groupes ont aussi la responsabilité d'un accélérateur en exploitation)
- Dispositifs expérimentaux et infrastructures d'envergure
- De nombreux développements autour des sources et de diagnostics plasma associés.
- Excellente visibilité au niveau européen et international

Activité nécessitant des investissements conséquents et besoins importants en infrastructure

- PACIFICS mais tout n'est pas financé dans les projets de R&D mentionnés
- Des équipements sont aujourd'hui obsolètes (alimentation de puissance ou Gyrotron)
- De plus en plus de contraintes Cryogéniques coûteuses

RH

- Renfort en CDD :
 - Q. Hars depuis le 11/10/24 sur l'optimisation des extractions sources d'ions (18 m, RP)
 - CDD sur Système PF NEWGAIN (24m, financement projet)
- Communauté limitée au niveau national ; Peu contact avec l'université et vivier d'étudiants faible



Réserve

Besoins en ions multichargés en France :

➤ produire $A/Q=6-7$ jusqu'à l'Uranium

- SPIRAL2 Phase 1++ , $10 \text{ p}\mu\text{A U}^{34+}$

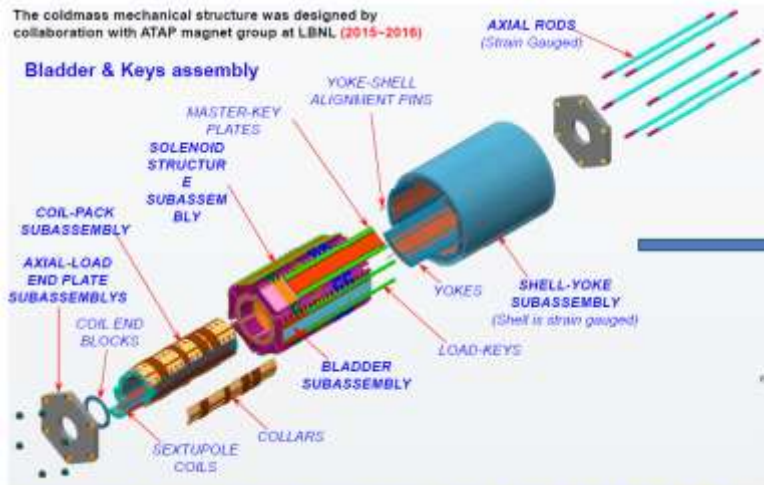
Besoin de faisceaux d'ions multichargés intenses dans le monde

Projet F-ECR (IMP Lanzhou, Chine, L.T. SUN)

Source supraconductrice @ 45 GHz

Aimants supra en Nb_3Sn (risque projet)

Intensité visée: $\sim 40 \text{ p}\mu\text{A U}^{35+}$



M. Juchno, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 28, no. 3, Apr. 2018, Art. no. 4602806

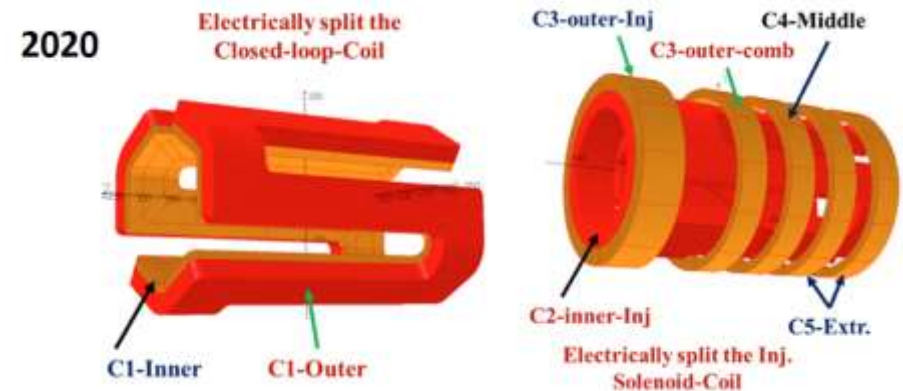
F-ECR (Chine)

Projet MARS (LBL, USA, D. Xie, J. Benitez)

Source supraconductrice @ 45 GHz

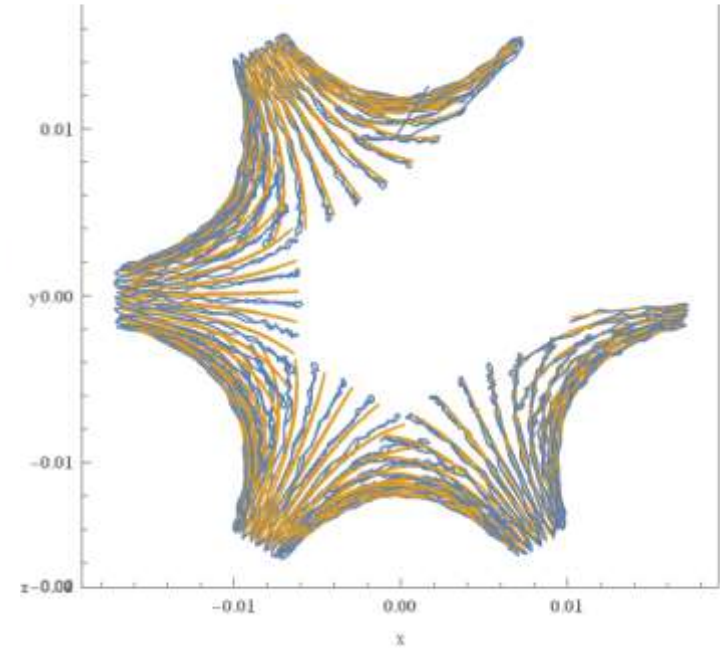
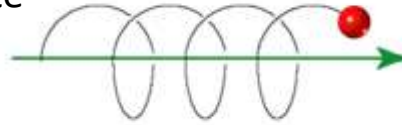
2 x Ioffe-bar sextupole (risque projet)

Intensité visée: $\sim 40 \text{ p}\mu\text{A U}^{35+}$

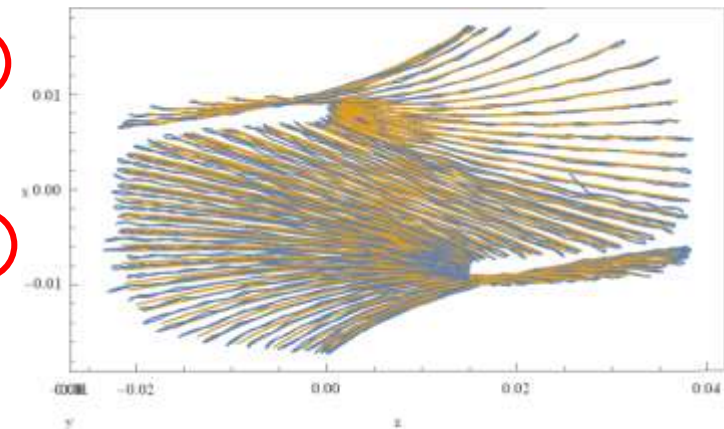


MARS (USA)

- ◆ Etude comparative des temps de calculs de trajectoires entre:
 - ◆ l'algorithme de Boris « leap frog »
 - ◆ la méthode du centre guide (GC) relativiste
- ◆ Appliqué à la structure magnétique de la source PHOENIX V2

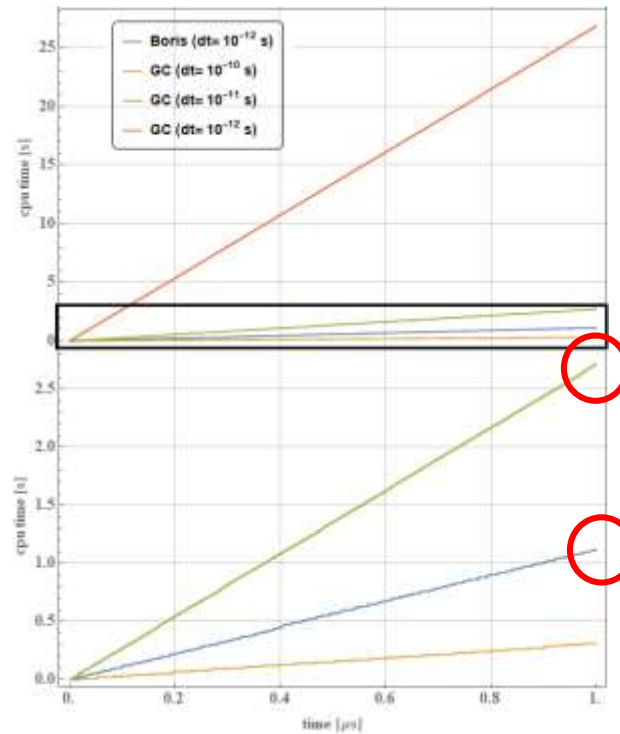


Comparaison Boris vs CG



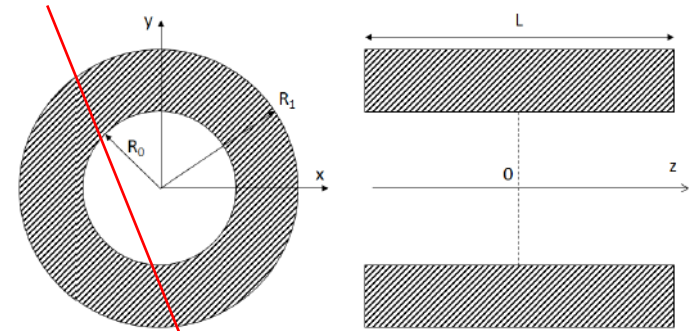
◆ Résultats:

- ◆ Gain de temps jusqu'à 300% avec GC
- ◆ Mais perte de la conservation de l'énergie / Boris



◆ Cas théorique le plus simple: champ analytique multipolaire « hard edge »

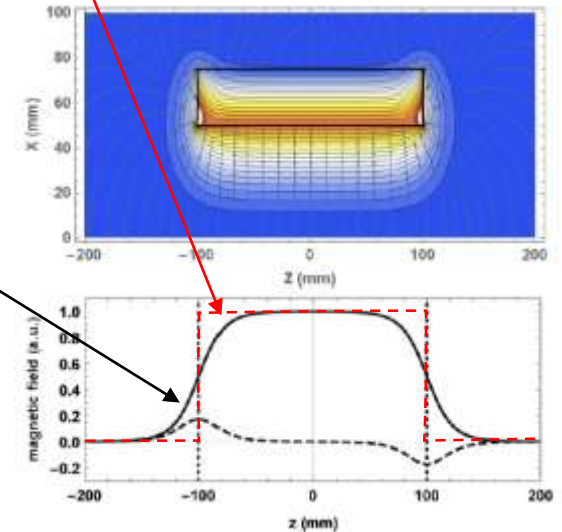
$$\begin{cases} B_x = B_0 \left(\frac{r}{R_0}\right)^{m-1} \cos((m-1)\theta) \\ B_y = -B_0 \left(\frac{r}{R_0}\right)^{m-1} \sin((m-1)\theta) \\ B_z = 0 \end{cases}$$



◆ Nouveau modèle analytique proposé à l'ordre 1 :

$$\begin{cases} B_r = B_0 \left(\frac{r}{R_0}\right)^{m-1} f_{\lambda,L}(z) \cos(m\theta) \\ B_\theta = -B_0 \left(\frac{r}{R_0}\right)^{m-1} f_{\lambda,L}(z) \sin(m\theta) \\ B_z = \frac{B_0 R_0}{m} \left(\frac{r}{R_0}\right)^m f'_{\lambda,L}(z) \cos(m\theta) \end{cases}$$

$$f_{\lambda,L}(z) = \frac{1}{\left(1+e^{\lambda(z-\frac{L}{2})}\right)\left(1+e^{-\lambda(z+\frac{L}{2})}\right)}$$

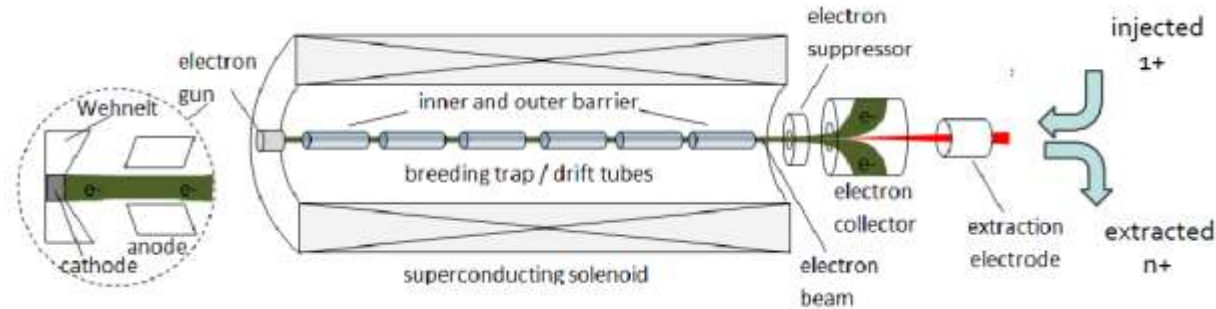


◆ Gain de mémoire (courbe 1D vs carte 3D) et de temps de calcul (moins d'opérations)

◆ Résultats bien plus précis qu'avec l'approximation « Hard Edge »

ECRIS VS EBIS


- ◇ Opération en pulsé pour atteindre de hautes efficacités
- ◇ Nécessite la préparation du faisceau avec un « cooler buncher » : coût, complexité
- ◇ Efficacité globale cool buncher + EBIS : 5 à 20 %
- ◇ Faible interaction des particules chargées avec les parois, vide limite 10^{-11} mbar → faible contamination



Limitation principale : flux d'ions 1+ dû au nombre max possible de charges stockées dans le cooler buncher ou l'EBIS

Technology	EBIS CB	ECRIS CB
Max 1+ RIB intensity	$< 10^{10}/s$	$> 10^{13}/s$
CB time to n+ (ms)	15 - 200	100 - 300
Operation mode	pulsed	CW or pulsed
Robustness	medium	high
1+n+ conversion efficiency	5 - 20%	10 - 20%
RIB total contamination rate extracted	$\sim 10^5/s$	$\sim 10^9 - 10^{10}/s$
Upstream requirement	Ion cooling	None
Maximum A/q	Bare ions	3 → A ~ 60 5-6 → A ~ 150

- De nombreux projets demandent de fortes intensités de faisceaux d'ions lourds stables
 - source d'ions de très hautes performances ($f_{\text{ECR}} \geq 28$ GHz) supraconductrices
 - fours fiabilisés pour produire des faisceaux d'ions métalliques intenses (ex. : uranium, calcium)
- Importante activité de R&D nécessaire

Ion	Intensité record obtenue (μA)	Intensité attendue (μA)	R&D nécessaire?	Installation
U³⁵⁺	~350 continu	1000	OUI ! (source+four)	HIRFL, IMP, Chine
U²⁸⁺	~400 (continu)	1000 pulsé	OUI (source+four)	FAIR, Allemagne
U³⁵⁺	~350	535	OUI (source+four)	RIKEN, Japon
Ar¹³⁺	930	1000	OUI (source+four)	SPIRAL2, France
U³³⁺ +U³⁴⁺	~400 U ³³⁺ 	270 U ³³⁺ + 270 U ³⁴⁺	OUI (four)	FRIB, MSU, USA

records intenable en fonctionnement