

# Le projet FRIENDS<sup>3</sup>

Fast Radioactive Ion Extraction and Neutralization Device for S<sup>3</sup>

**Vladimir Manea**  
IJCLab, Orsay, France

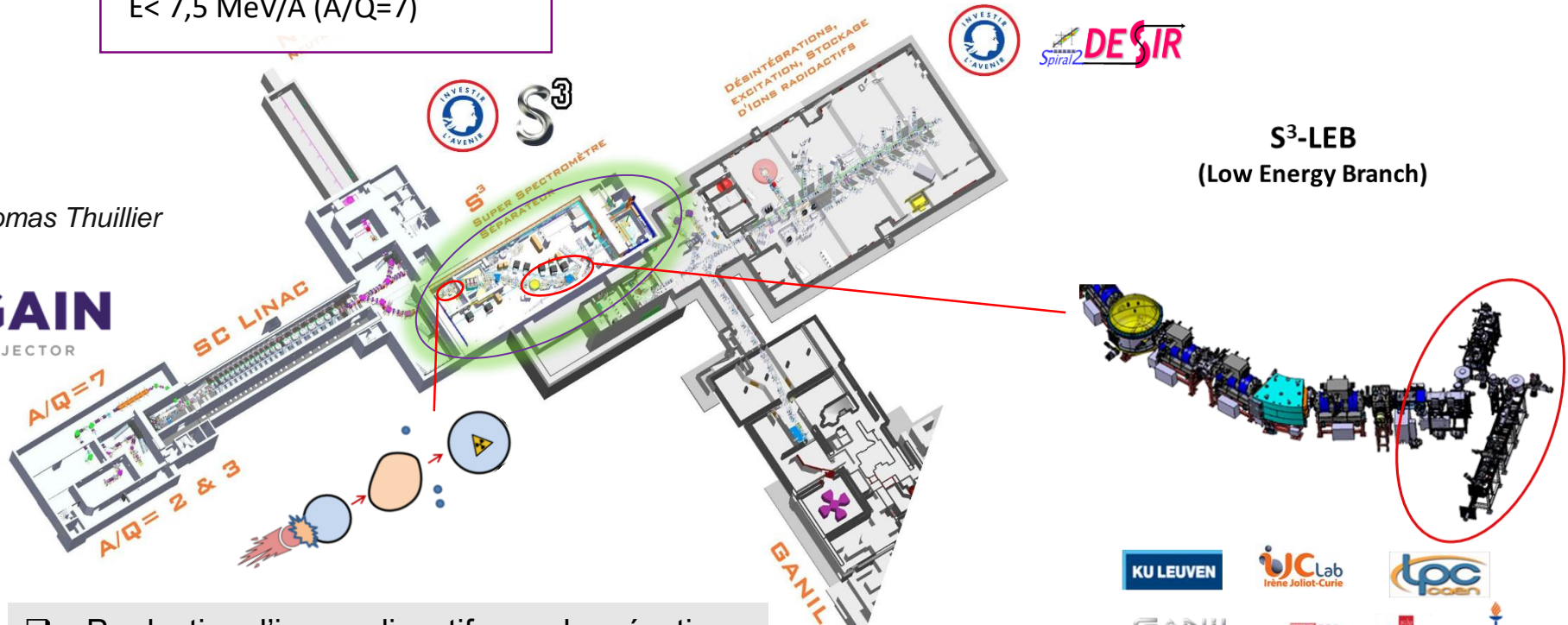


ANR-21-CE31-0001

- Contexte scientifique
- Technology readiness levels (TRL)
  - Etat de l'art
  - Projet FRIENDS<sup>3</sup>
- Calendrier du projet
- Développements et résultats récents
- Conclusions

LINAC beams for S<sup>3</sup> : He to U  
E < 14,5 MeV/A (A/Q=3)  
E < 7,5 MeV/A (A/Q=7)

## Super Separator Spectrometer (S<sup>3</sup>)



Présentation Thomas Thuillier  
mercredi

**NEWGAIN**  
NEW GANIL INJECTOR

- ☐ Production d'ions radioactifs par des réactions de fusion-évaporation

KU LEUVEN

ijc Lab  
Irène Joliot-Curie

lpc  
loren

GANIL

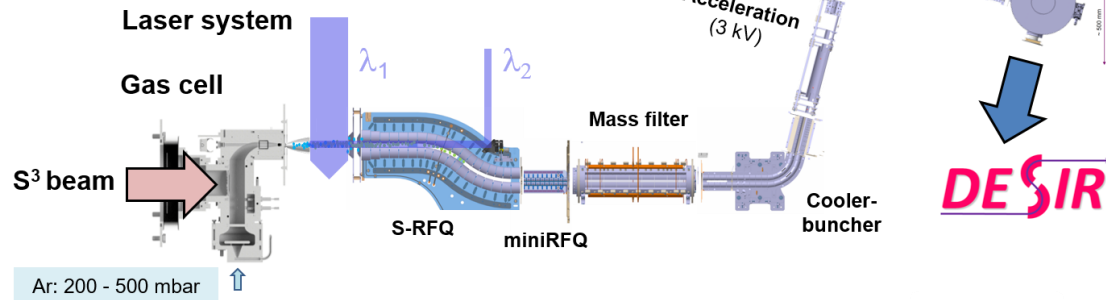
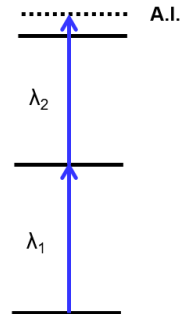
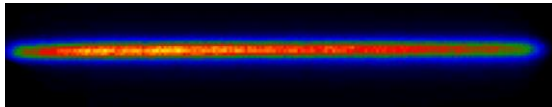
LARISSA

UNIVERSITY OF WISCONSIN

UNIVERSITY OF JYVASKYLÄ

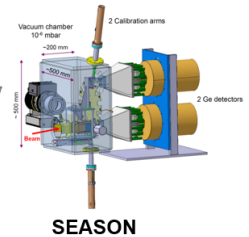
- ❑ **Spectroscopie laser par ionisation résonnante** en jet supersonique
- ❑ Détection aidée par l'identification de masse ou d'énergie de décroissance

A. Zadornaya et al., PRX 8 (2018) 041008



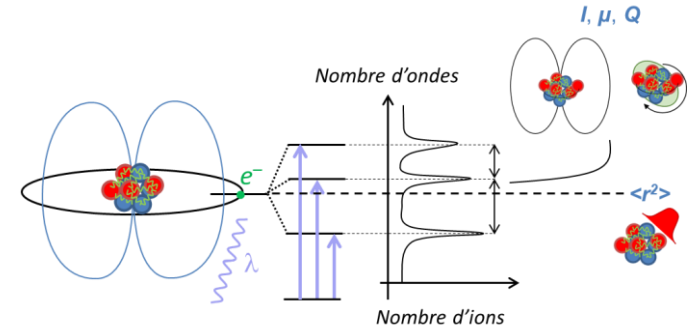
Mass spectrometer

Decay station



**DE SIR**

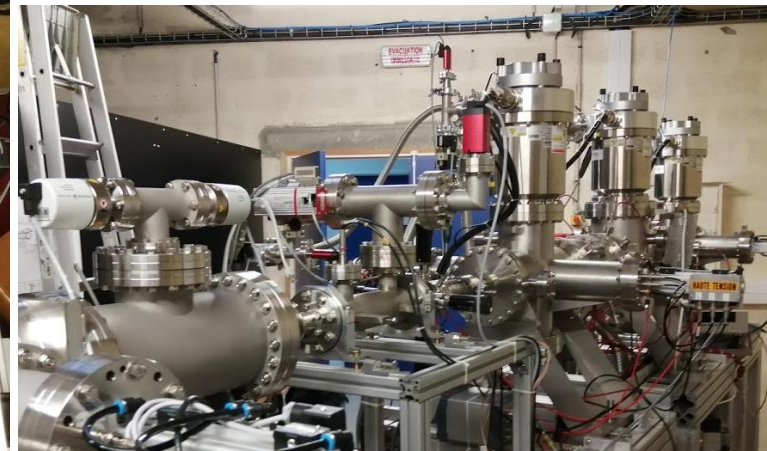
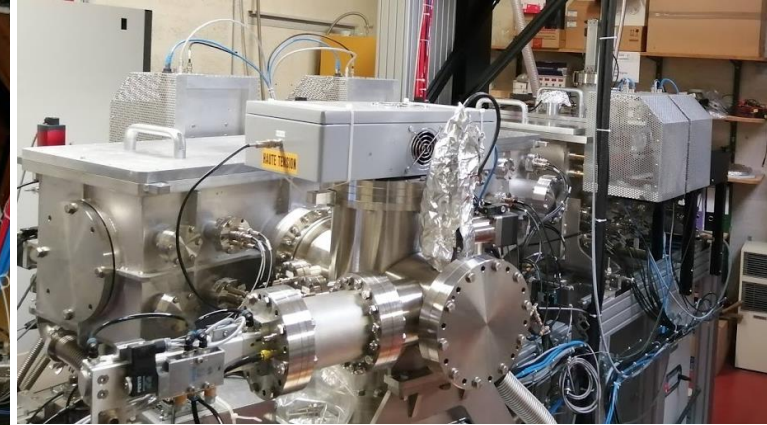
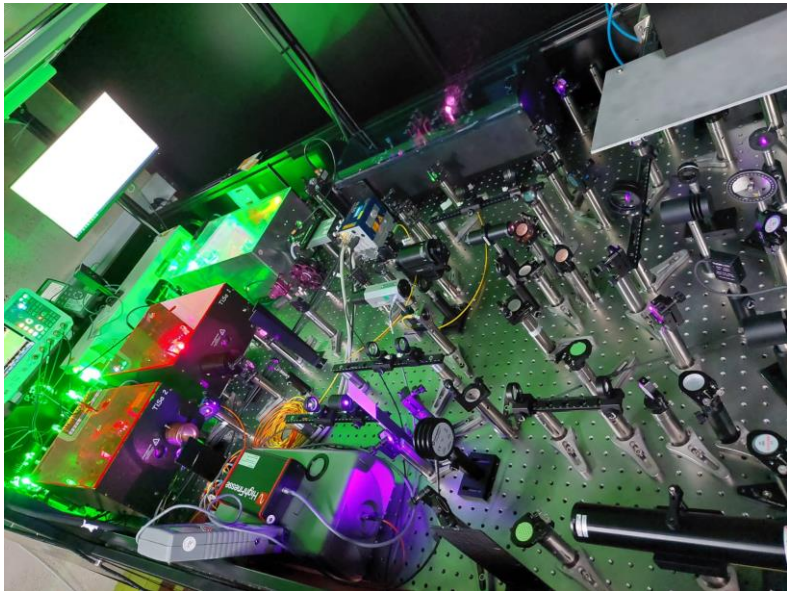
- ❑ Détermination des **propriétés électromagnétiques** fondamentales du noyau atomique



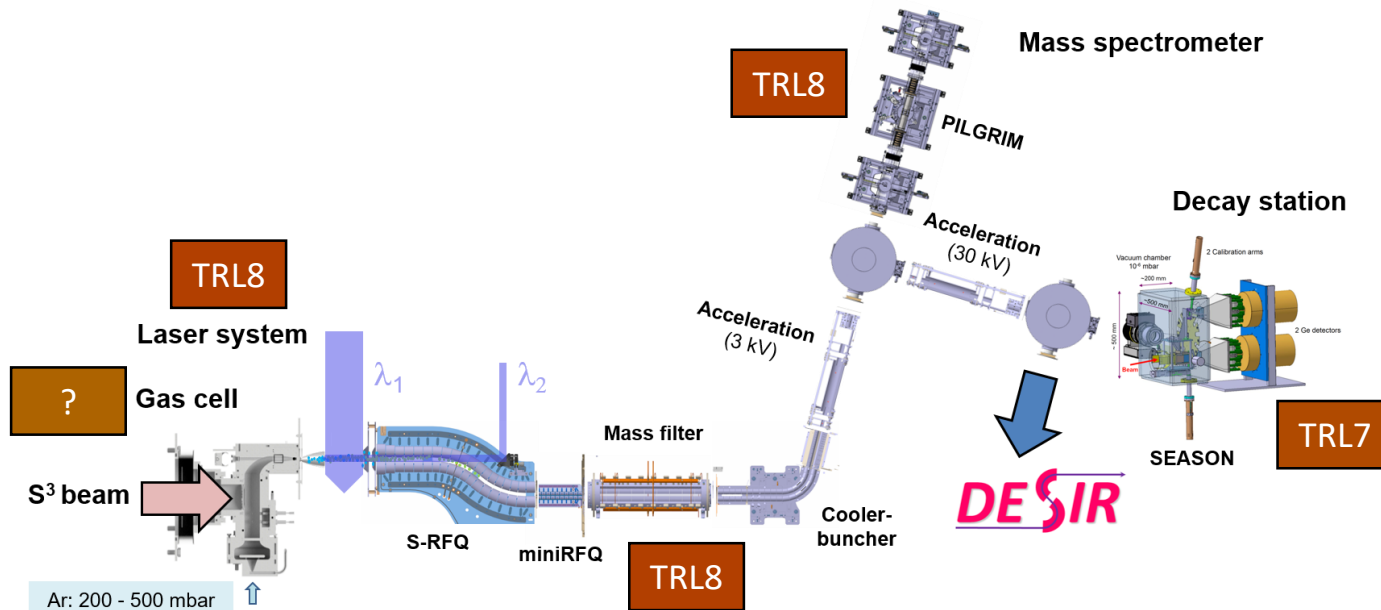
R. Ferrer et al., Nucl. Instr. Meth. B 317, 570-581 (2013)  
J. Romans, et al., Atoms 10, 21 (2022)  
A. Ajayakumar et al., NIMB 539, 102-107 (2023)



- ❑ S<sup>3</sup>-LEB a été assemblé et testé au LPC Caen.
- ❑ Installation en 2024 au point focal de S<sup>3</sup>.
- ❑ Premières expériences à l'horizon 2025.



- ❑ Tous les sous-systèmes ont un TRL haut, avec un point d'interrogation sur la cellule à gaz.

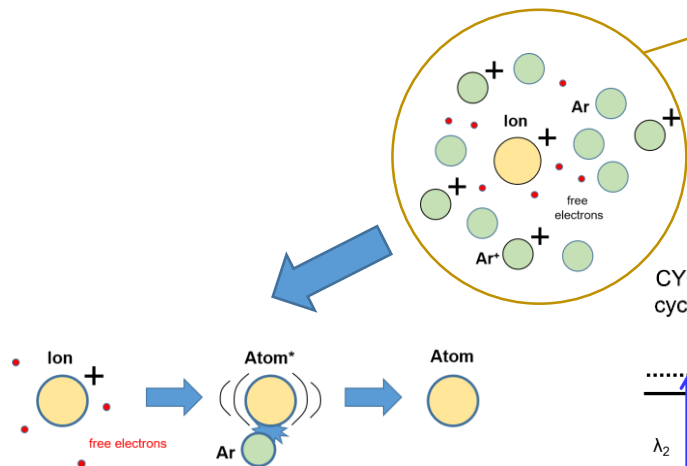


- TRL1 • Basic principles observed
- TRL2 • Technology concept formulated
- TRL3 • Experimental proof of concept
- TRL4 • Technology validated in lab
- TRL5 • Technology validated in relevant environment
- TRL6 • Technology demonstrated in relevant environment
- TRL7 • System prototype demonstration in operational environment
- TRL8 • System complete and qualified
- TRL9 • Actual system proven in operational environment

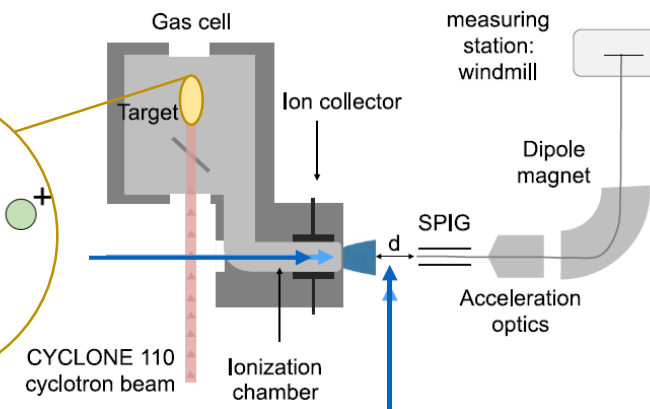
Relevant environment = cellule à gaz  
 Operational environment = sous faisceau radioactif

☐ Preuve de principe à Louvain la Neuve

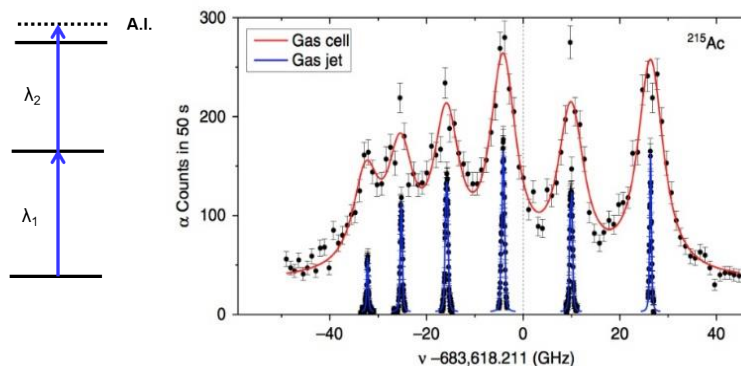
☐ Le faisceau primaire très intense génère un plasma dans la gas cell



☐ Dans le plasma, des processus de recombinaison neutralisent les ions radioactifs



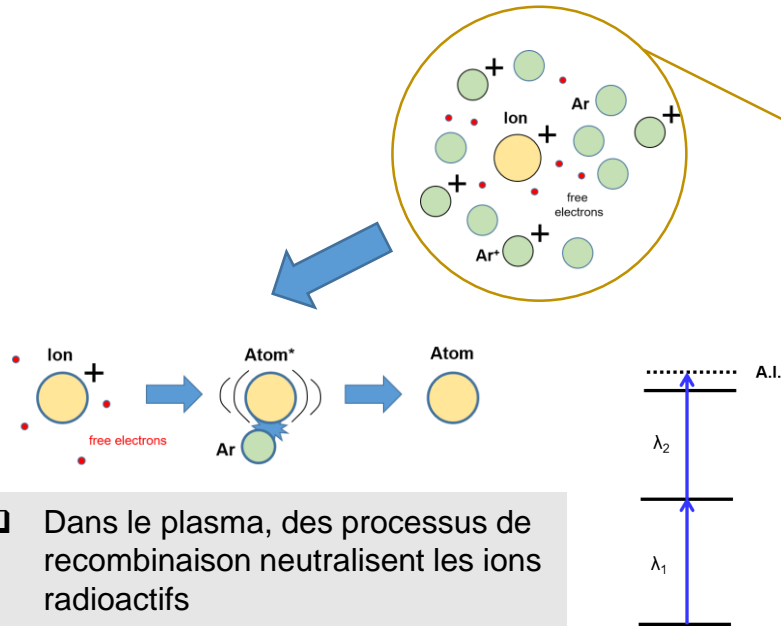
**TRL9**



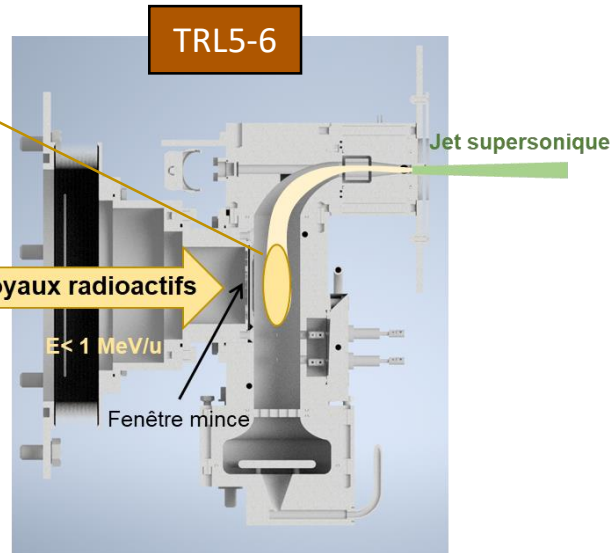
- TRL1 • Basic principles observed
- TRL2 • Technology concept formulated
- TRL3 • Experimental proof of concept
- TRL4 • Technology validated in lab
- TRL5 • Technology validated in relevant environment
- TRL6 • Technology demonstrated in relevant environment
- TRL7 • System prototype demonstration in operational environment
- TRL8 • System complete and qualified
- TRL9 • Actual system proven in operational environment

❑ Le faisceau **secondaire intense (ou non)** génère un plasma dans la gas cell

❑ L'efficacité de neutralisation dépend de l'intensité du faisceau d'ions radioactifs



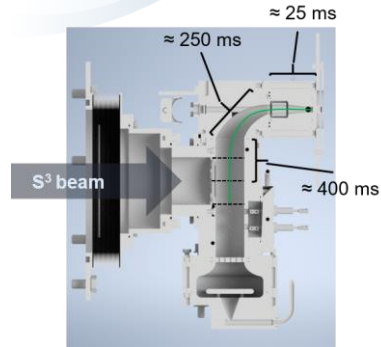
❑ Dans le plasma, des processus de recombinaison neutralisent les ions radioactifs



- TRL1 • Basic principles observed
- TRL2 • Technology concept formulated
- TRL3 • Experimental proof of concept
- TRL4 • Technology validated in lab
- TRL5 • Technology validated in relevant environment
- TRL6 • Technology demonstrated in relevant environment
- TRL7 • System prototype demonstration in operational environment
- TRL8 • System complete and qualified
- TRL9 • Actual system proven in operational environment

Relevant environment = cellule à gaz  
Operational environment = sous faisceau radioactif



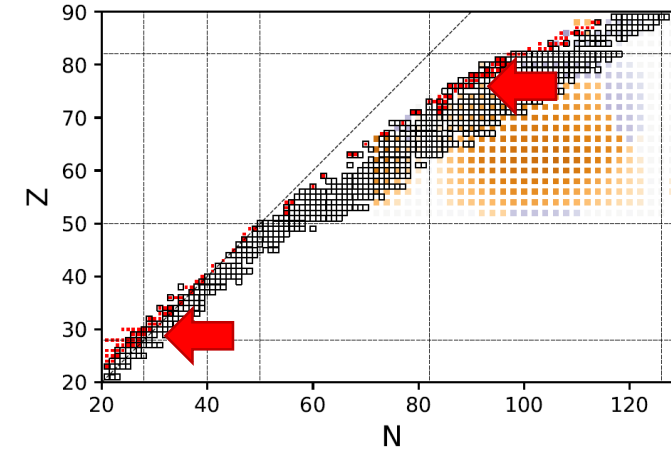


E. Mogilevskiy *et al.* (KU Leuven)

Trou sortie	T extraction
d=1 mm	630 ms
d=1.5 mm	280 ms

□ Limitation :

- Temps d'extraction trop long pour certains isotopes.



- Production S<sup>3</sup>
- T<sub>1/2</sub> < 250 ms

<https://u.ganil-spiral2.eu/chartbeams/>

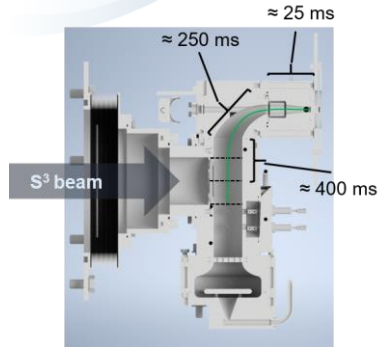
M. Kortelainen *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 024313 (2010)

E. Mogilevskiy *et al.* (KU Leuven)

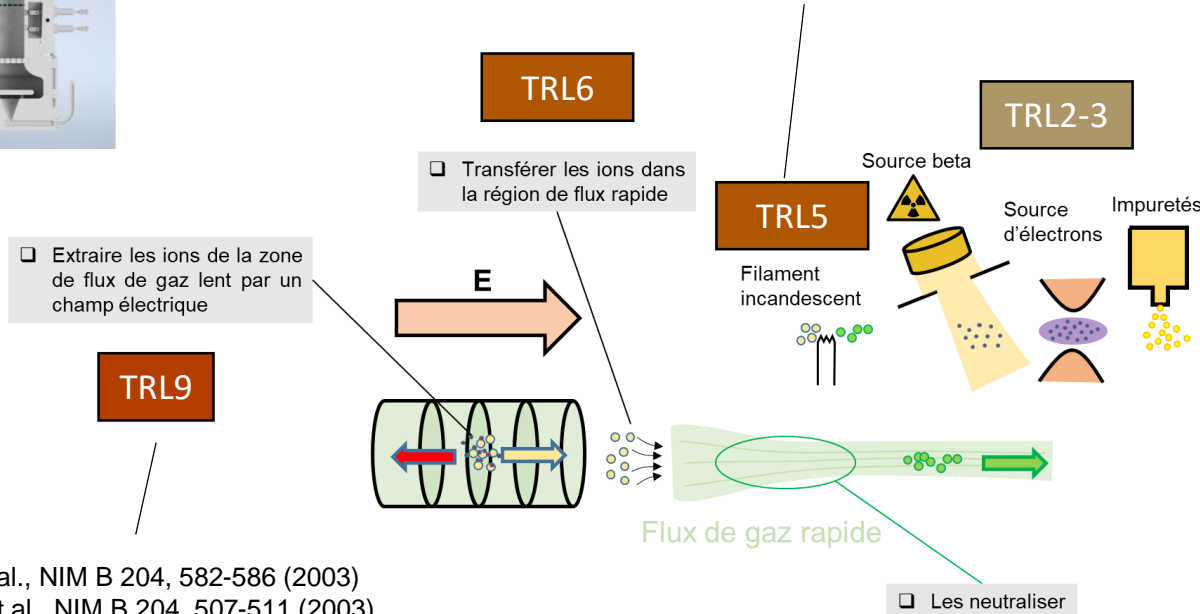
Trou sortie	T extraction
d=1 mm	630 ms
d=1.5 mm	280 ms

□ Limitation :

- Temps d'extraction trop long pour certains isotopes.



S. Raeder *et al.*, NIM B 463, 272-276 (2020)



□ Une deuxième limitation : efficacité de neutralisation

Projet FRIENDS<sup>3</sup>



ANR-21-CE31-0001

- G. Savard *et al.*, NIM B 204, 582-586 (2003)
- S. Schwarz *et al.*, NIM B 204, 507-511 (2003)
- J. B. Neumayr *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 77, 065109 (2006)
- J. B. Neumayr *et al.*, NIM B 244, 489-500 (2006)
- C. Droese *et al.*, NIM B 338, 126-138 (2014)
- M. Ranjan *et al.*, NIM B 770, 87-97 (2015)



ANR-21-CE31-0001

❑ Objectif global du projet : construire une cellule à gaz rapide de neutralisation

- ✓ Développer un protocole de simulation des processus dans la cellule à gaz
- ✓ Construire un banc de test pour des études expérimentales

avec les mêmes outils

Développer un prototype jusqu'à

TRL6

Futur financement

TRL9

avec ces outils

Réaliser d'autres futurs développements pour S<sup>3</sup>-LEB au niveau sans complications d'accès et intégration

TRL6

### Budget

- 24 mois postdoc
- 200 kEUR dépenses

### Equipe ≈ 2 ETP/an

- Vladimir Manea (resp.), Serge Franchoo, David Lunney, Enrique Minaya-Ramirez
- Thierry Hourat, Samuel Roset (BE)
- Elodie Morin (postdoctorante)
- Wenling Dong (doctorante)

☐ Planning révisé avril 2023:

Cellule = 2 mois

Tâches	2021	2022	2023	2024	2025
1. Etude préparatoire	█	█			
2. Postdoc			█	█	█
3.1 Construction Phase I		█	█	█	
3.2 Construction Phase II				█	█
4. Tests à IJCLab			█	█	
5. Préparation de l'espace au GANIL			█	█	
6. Transport et installation au GANIL			█	█	
7. Mesures au GANIL				█	█

Phase I: Banc de test sans cellule à gaz rapide  
Phase II: Construction de la cellule à gaz rapide (TRL6)

démarrage

aujourd'hui

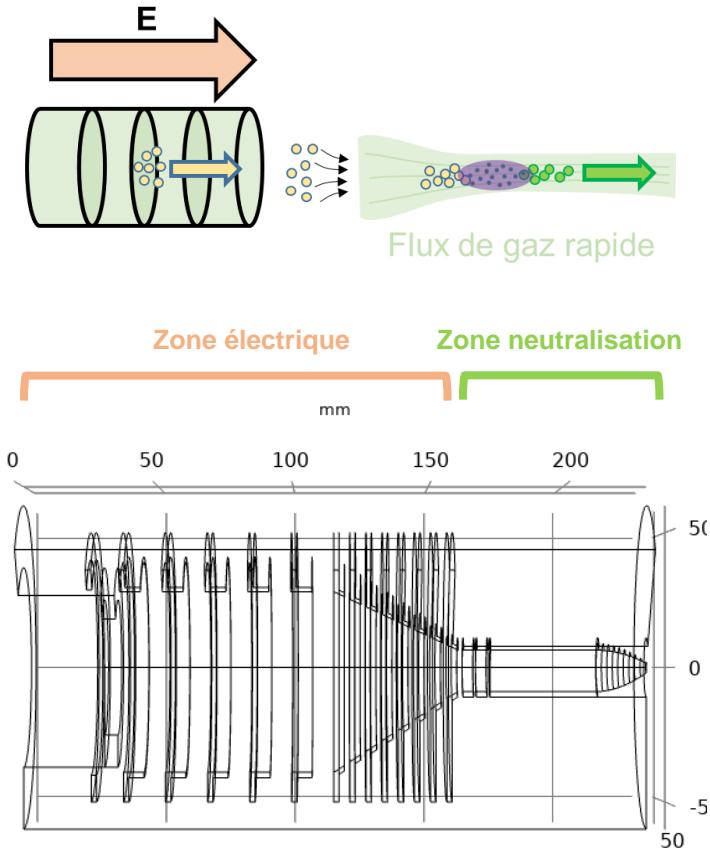
Phase I

Phase II

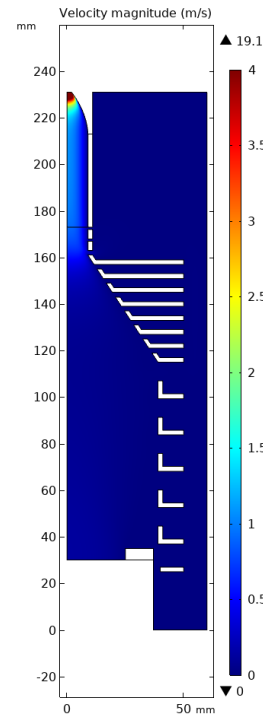
Besoin de lasers

fin financement

- Etude l'extraction rapide des ions entre les deux zones



**COMSOL**  
(licence mutualisée IN2P3)

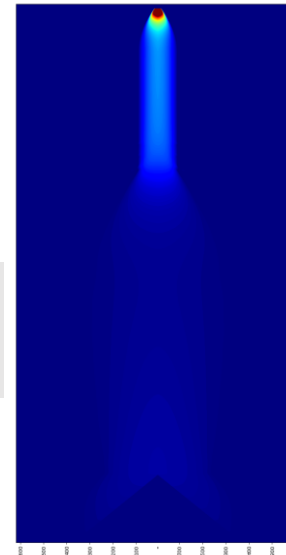


Simulation du flux de gaz (module CFD)

Python



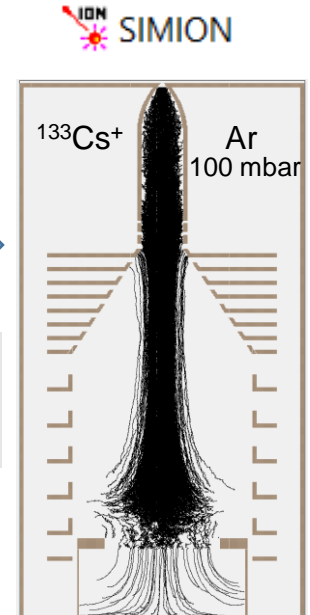
Conversion en  
fichier d'entrée  
SIMION



SIMION  
(module SDS)



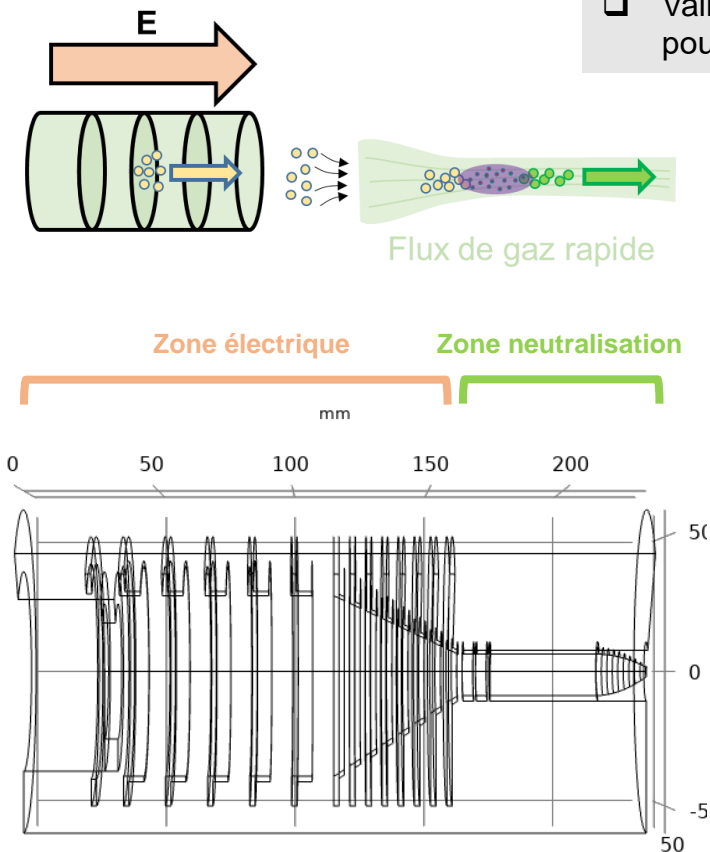
Efficacités et  
des temps  
d'extraction



Simulation du parcours d'ions

❑ Optimisation de la géométrie et des tensions

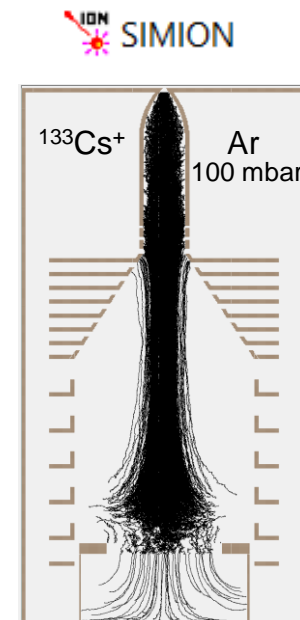
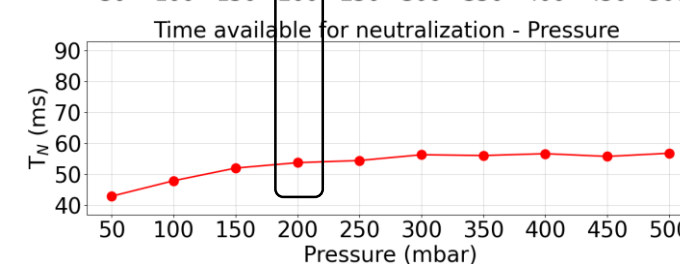
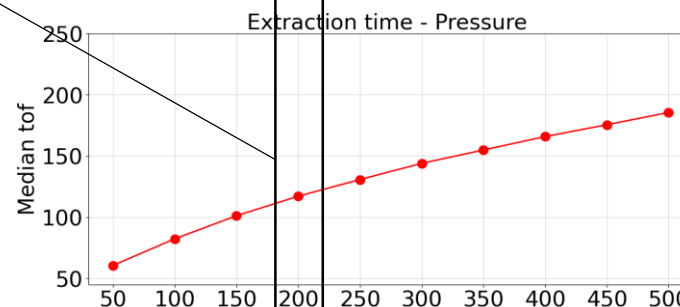
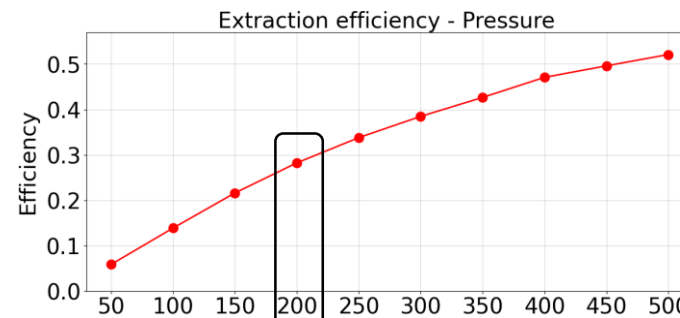
❑ Validation du design  
pour l'objectif TRL6



~ 30%

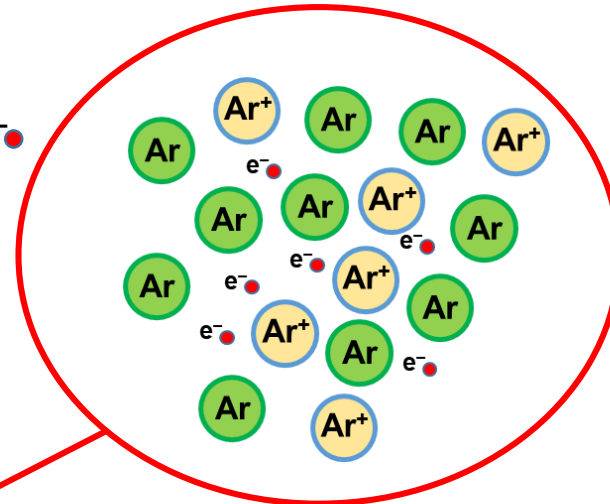
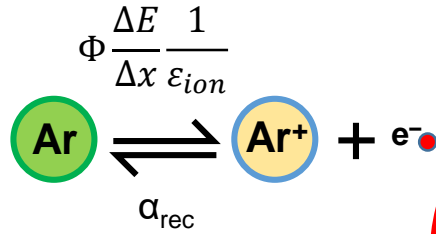
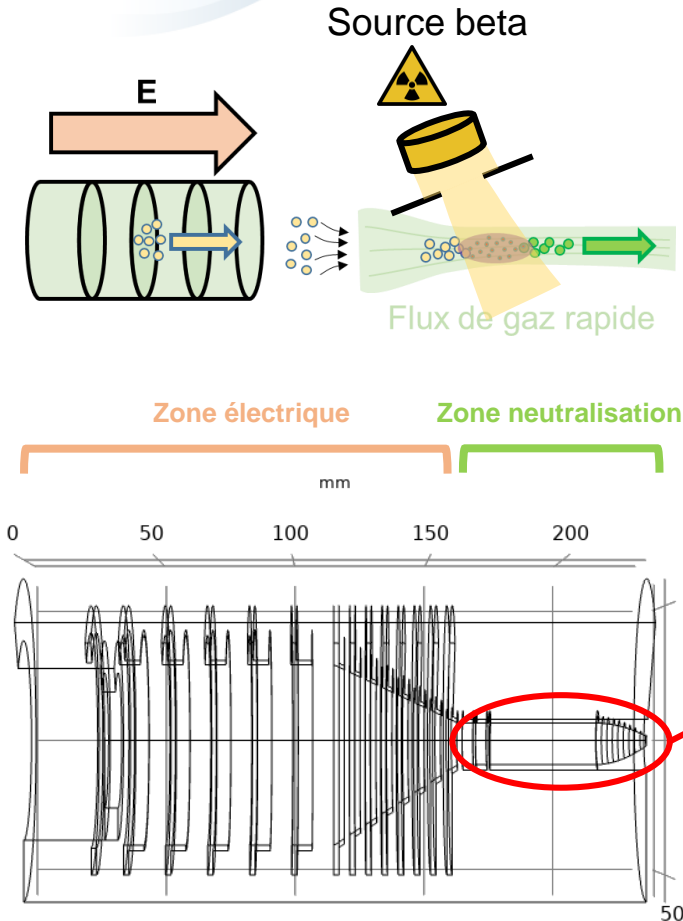
~ 120 ms

~ 55 ms



Travail de Wenling Dong

Calcul de la densité de charge d'équilibre



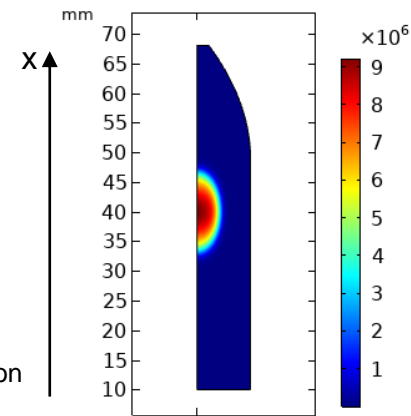
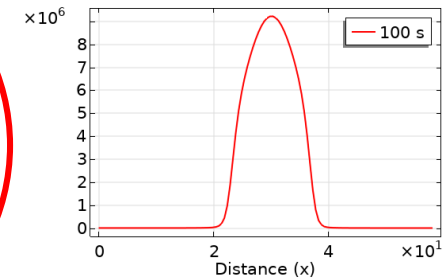
Densité d'équilibre

	Maximum equilibrium electron density (1/cm <sup>3</sup> )	
Analytical	$2.0 \times 10^7$	Sans convection ou migration
COMSOL	$0.9 \times 10^7$	

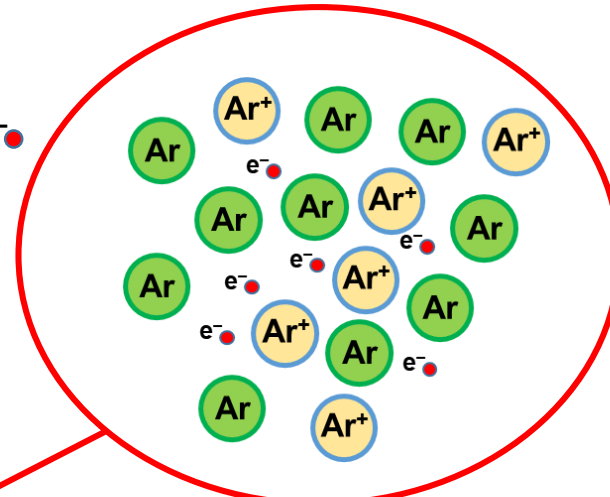
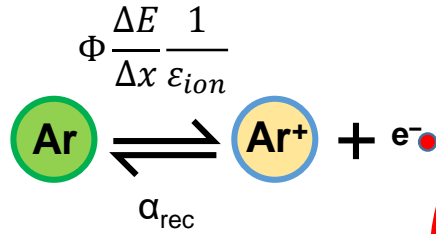
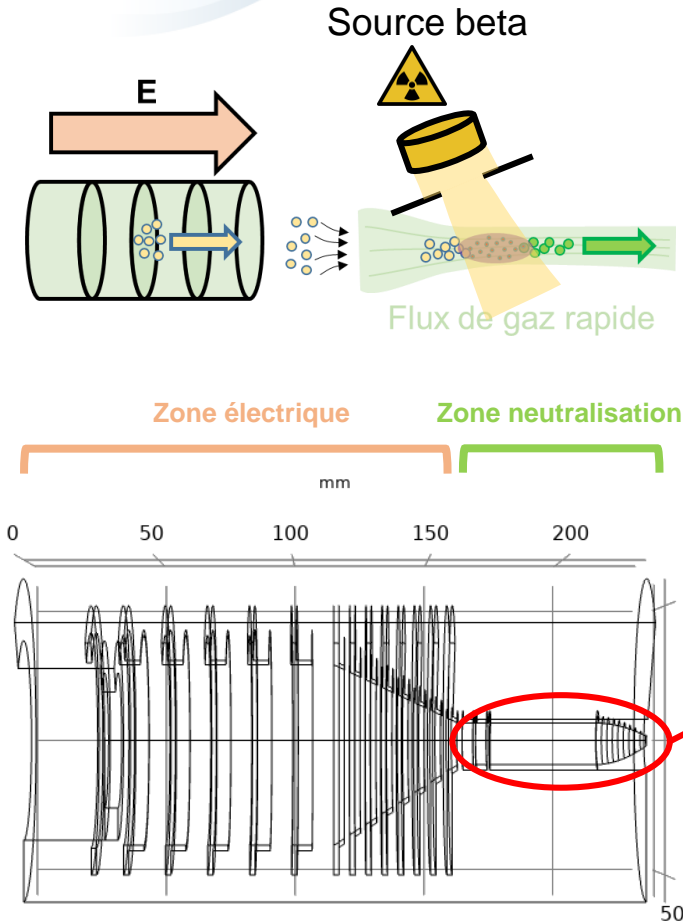
Activité béta 40 MBq, pression 100 mbar

Travail de Wenling Dong

COMSOL



Calcul de la densité de charge d'équilibre



Densité d'équilibre

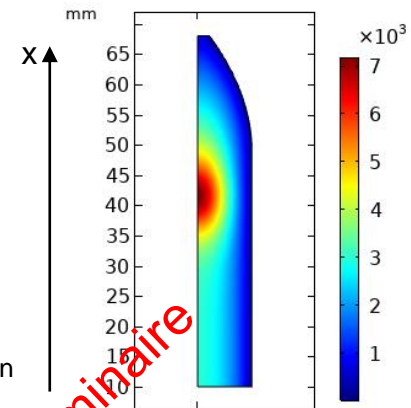
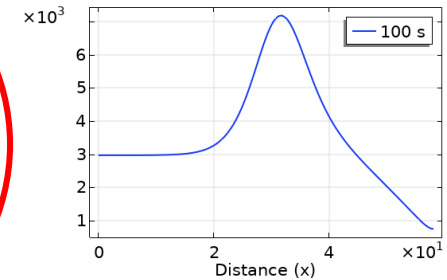
	Maximum equilibrium electron density (1/cm <sup>3</sup> )
Analytical	$2.0 \times 10^7$
COMSOL	$0.7 \times 10^4$

Avec convection et migration

Activité bêta 40 MBq, pression 100 mbar

Travail de Wenling Dong

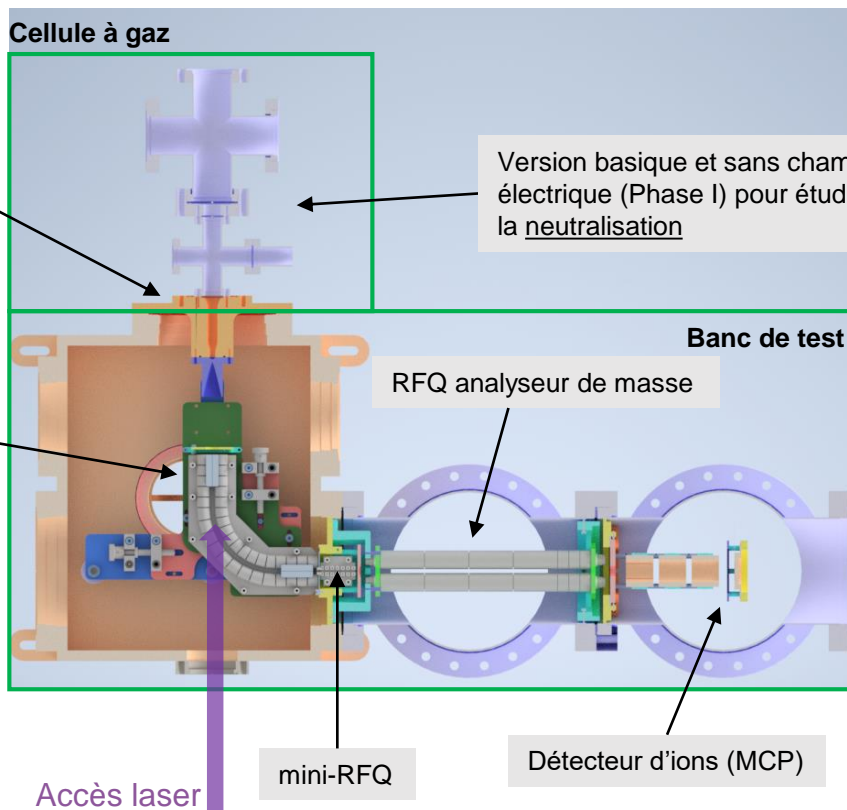
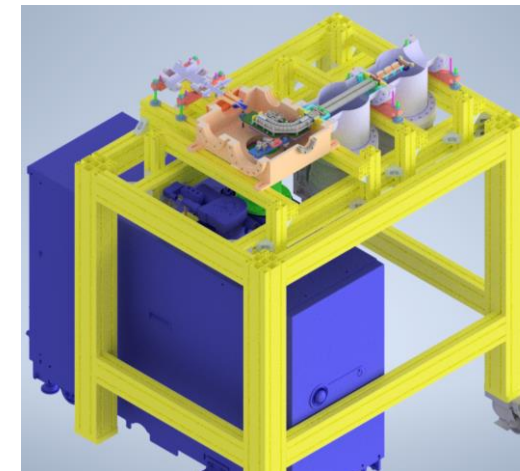
COMSOL



Préliminaire

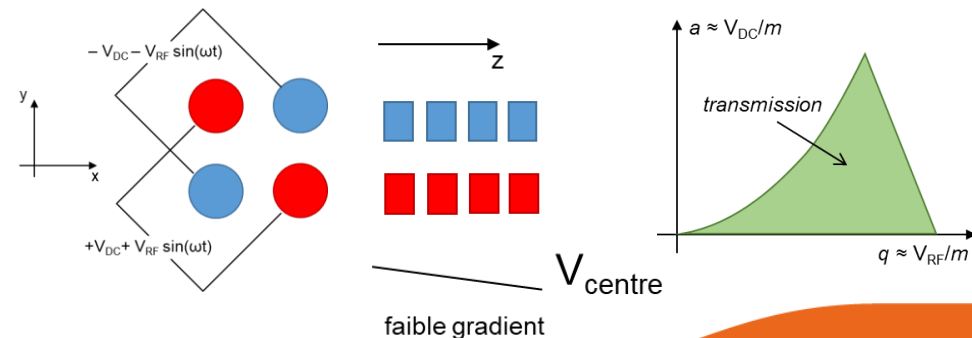


- Etude mécanique du banc de test presque finalisé.



Version basique et sans champ électrique (Phase I) pour étudier la neutralisation

- Des RFQs pour:
  - guider les ions ( $V_{DC} = 0$ )
  - analyser la masse ( $V_{DC} > 0$ )



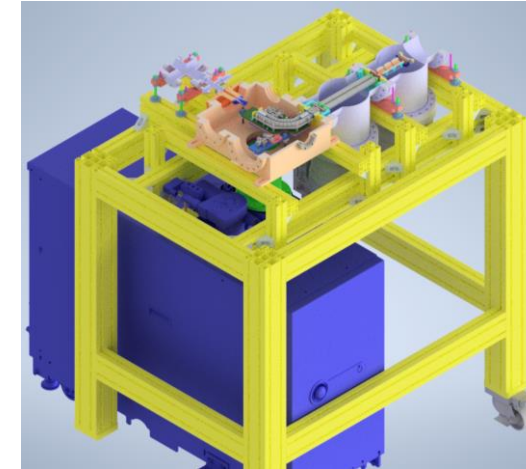
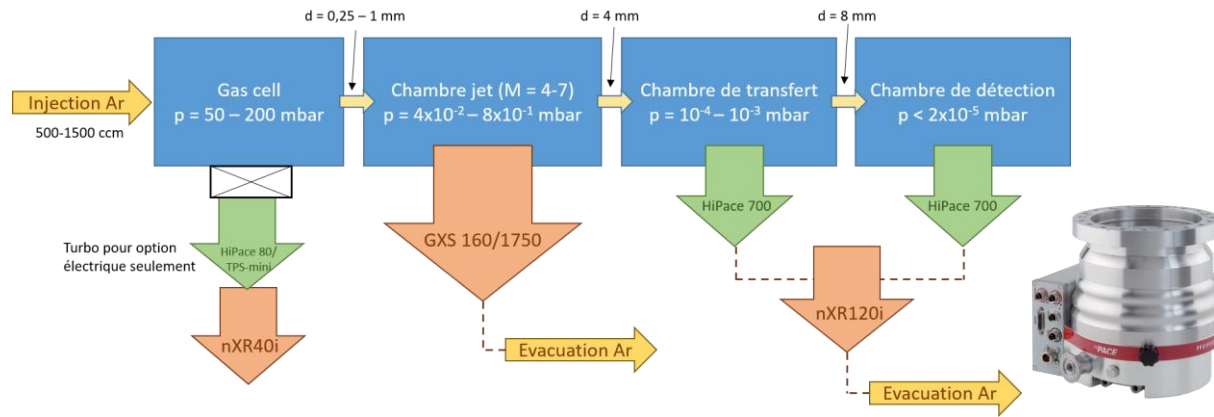
Accès laser

mini-RFQ

DéTECTEUR d'ions (MCP)

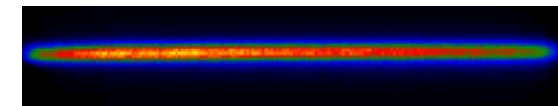
RFQ courbé et mini-RFQ: contribution de KU Leuven (Kudryavtsev et al., NIMB 297, 2013)

- Système de vide défini et acheté
- Besoin de pompage différentiel important

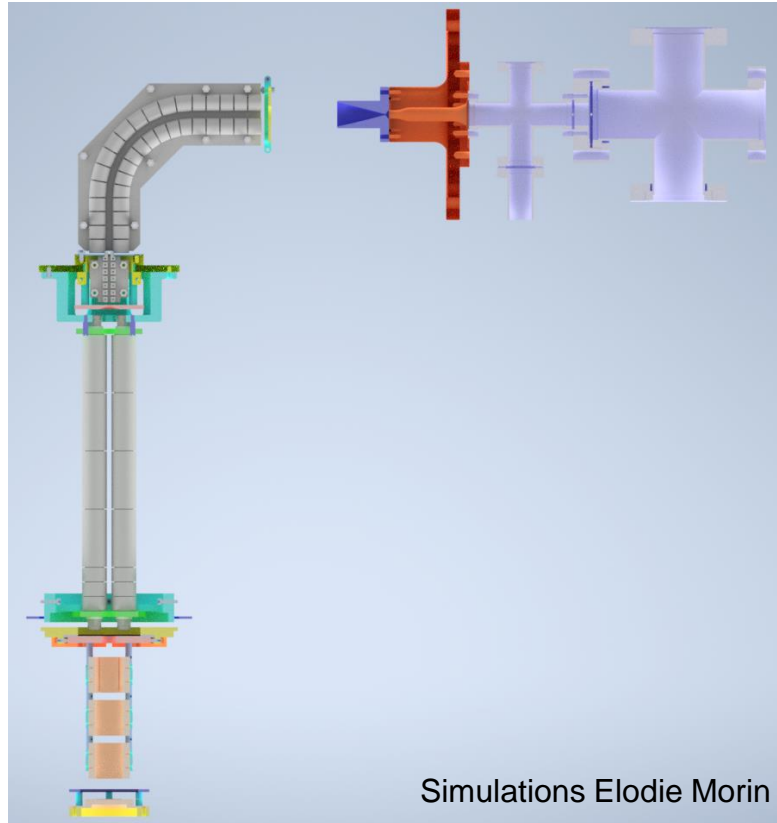


- Vitesse de pompage dans la chambre du jet de quelques 100s L/s @ 0.1 mbar pour obtenir un jet parallèle et homogène.

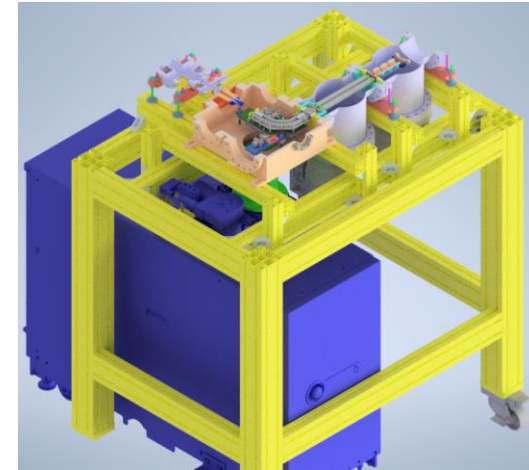
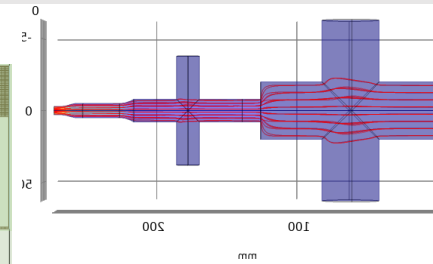
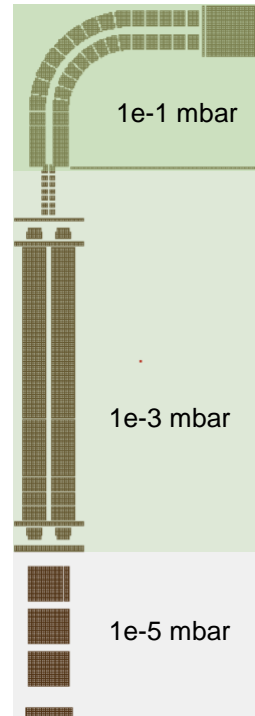
A. Zadvornaya et al., PRX 8 (2018) 041008



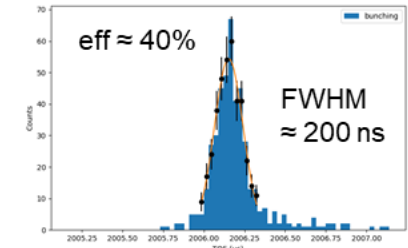
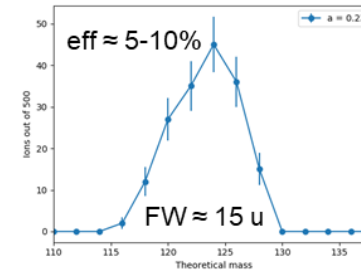
☐ Simulations du système de transport d'ions



☐ Simulation du flux de gaz dans la cellule à gaz simple.



- ☐ Efficacité globale préliminaire 70% (en transmission)
- ☐ Possibilité de sélectionner 10-15 unités de masse à une efficacité de 5-10%



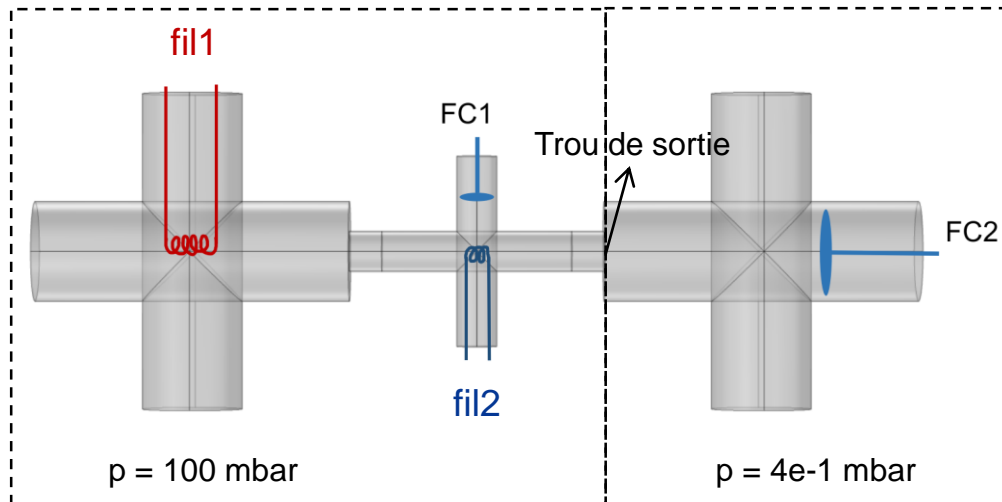
- ❑ Cellule à gaz simplifiée et détection directe à la sortie

Filament Ta + solution



Source d'ions

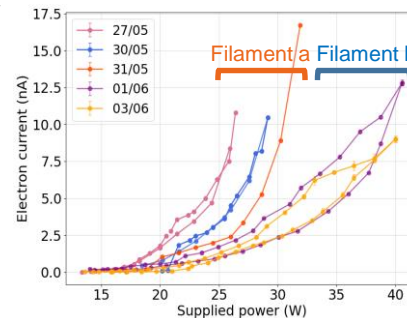
Cellule à gaz Phase I



Chambre de détection

Source d'électrons

Filament W



- ❑ Optimisation de la production d'ions et d'électrons dans le gaz

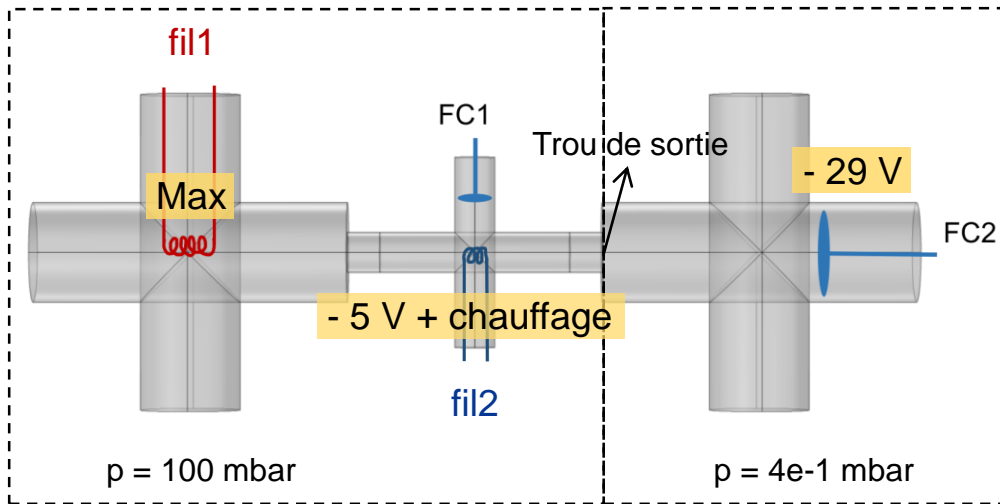
❑ Cellule à gaz simplifiée et détection directe à la sortie

Filament Ta + solution



Source d'ions

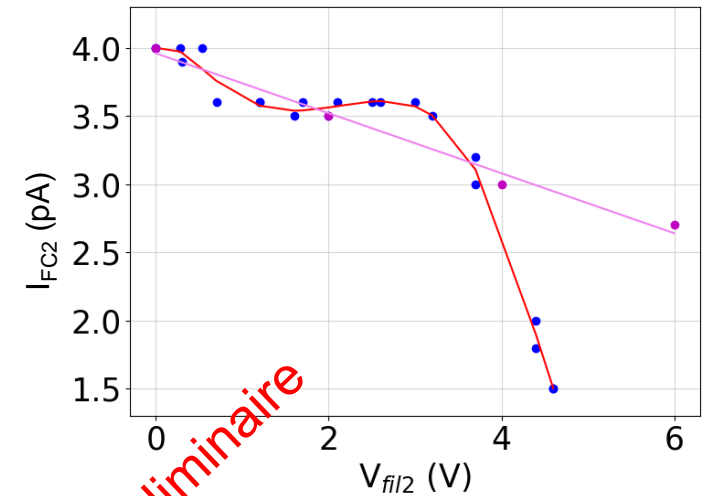
Cellule à gaz Phase I



Chambre de détection

❑ Mesure de l'effet de l'émission du filament W sur les ions du filament Ta

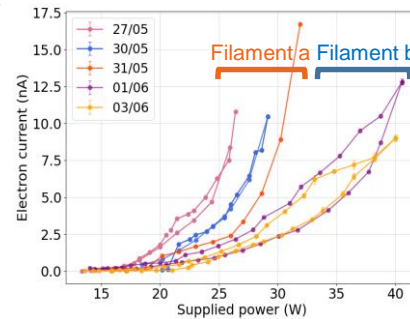
— Perte par attraction  
— Perte par chauffage (effet des électrons?)



Préliminaire

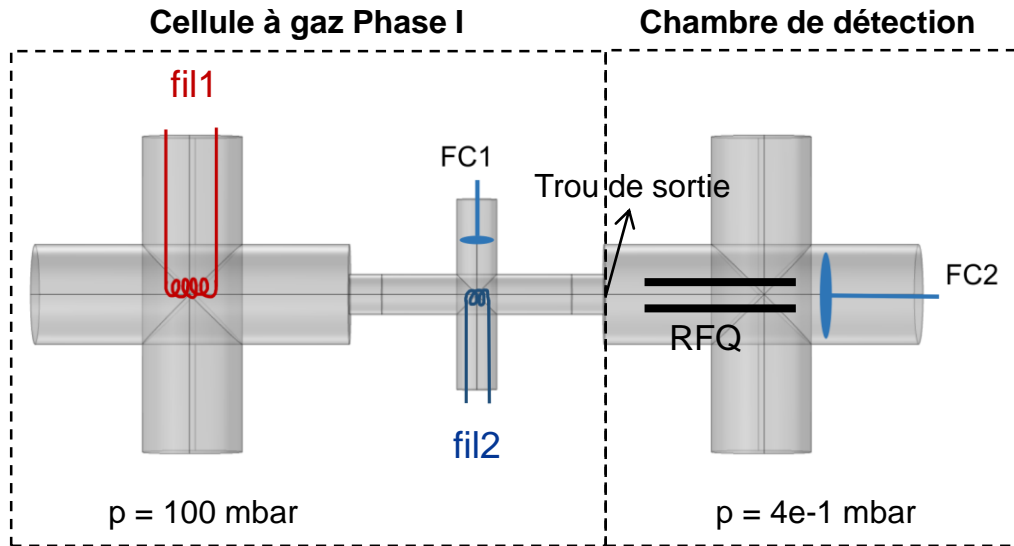
Source d'électrons

Filament W

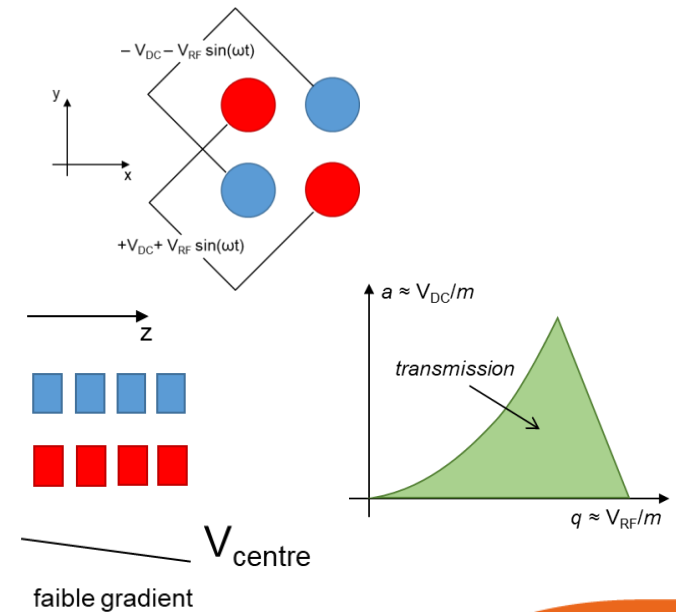


❑ Optimisation de la production d'ions et d'électrons dans le gaz

- Construction d'un petit RFQ d'extraction



- Utilisation du RFQ en tant que séparateur de masse grossier (mauvaise résolution dû à la haute pression)

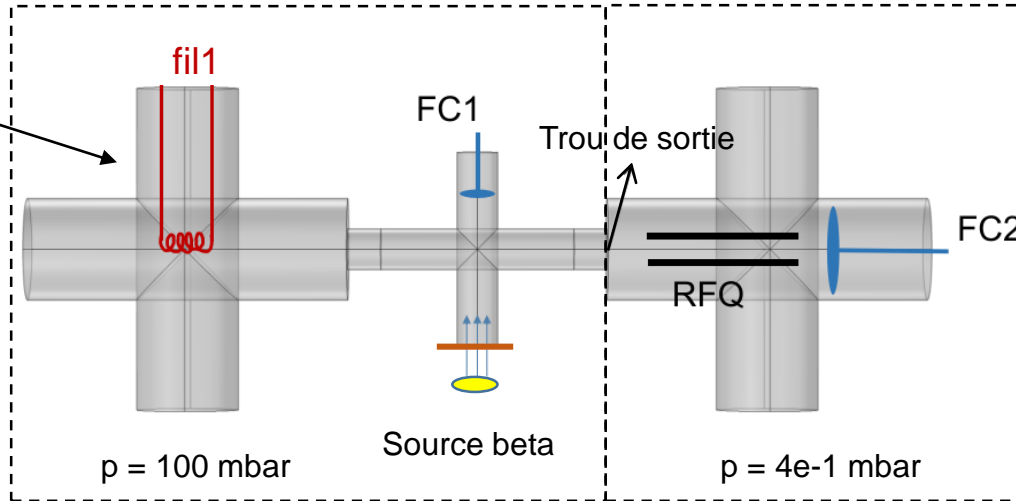


- Construction d'un petit RFQ d'extraction pour filtrer les ions d'Ar et les électrons.

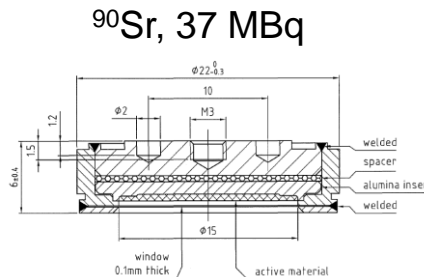
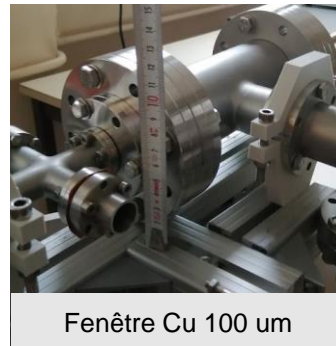
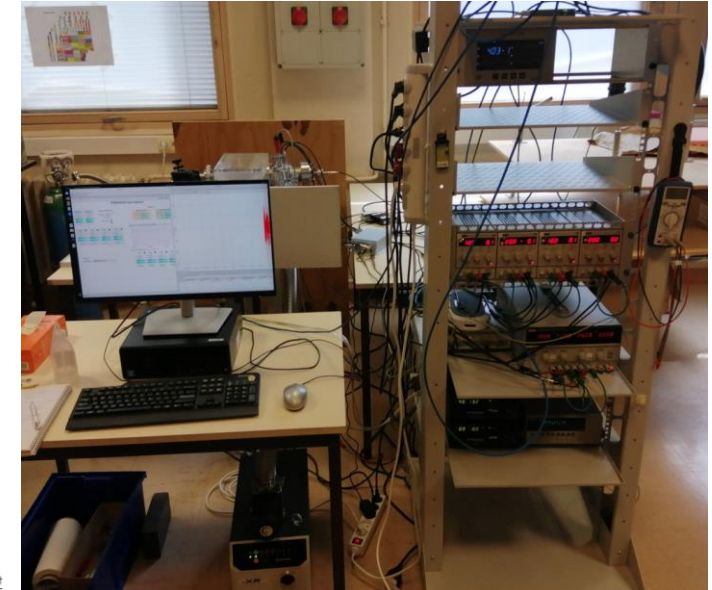
## Cellule à gaz Phase I

## Chambre de détection

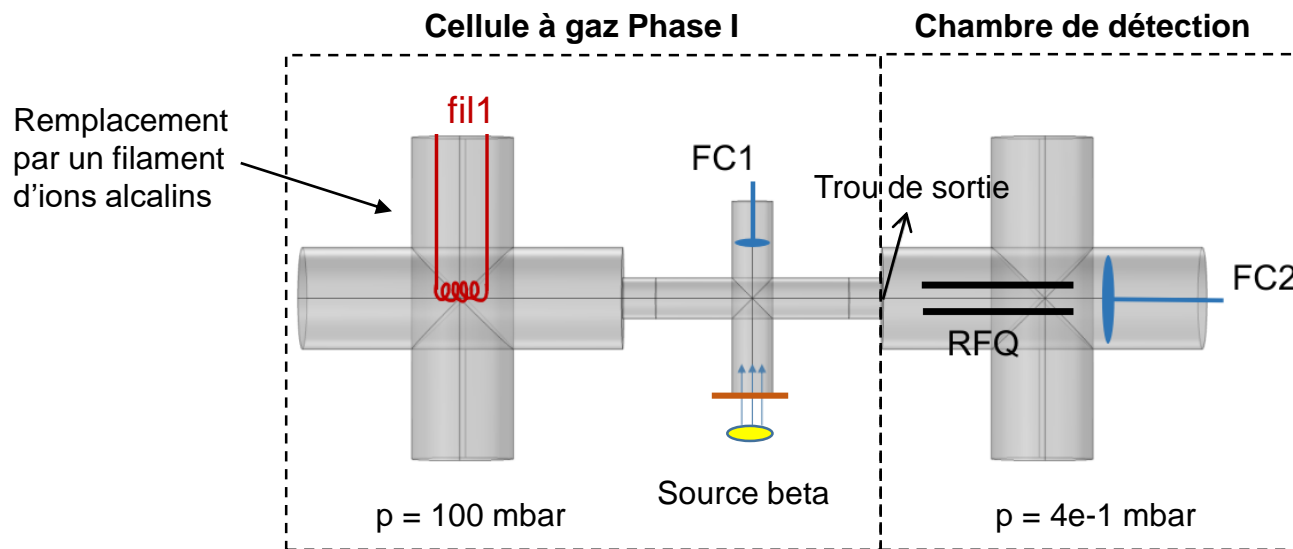
Remplacement  
par un filament  
d'ions alcalins



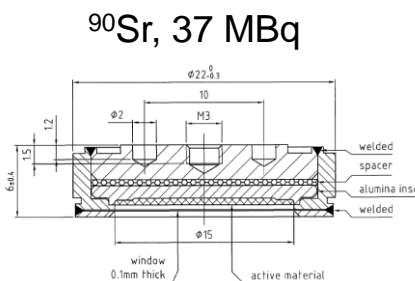
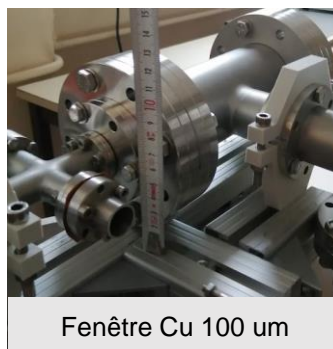
- Installation du banc dans une salle autorisée pour l'utilisation des sources scellées.



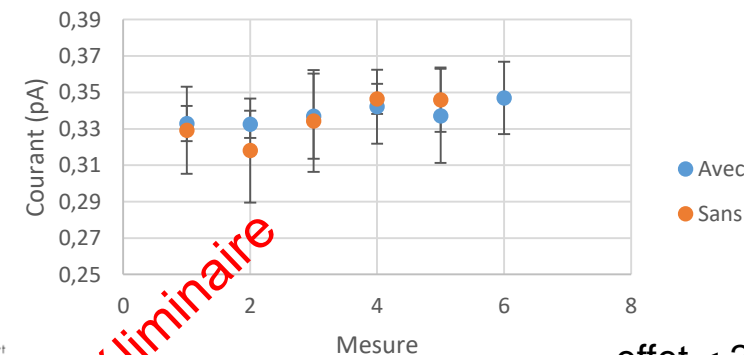
- Construction d'un petit RFQ d'extraction pour filtrer les ions d'Ar et les électrons.



- Installation du banc dans une salle autorisée pour l'utilisation des sources scellées.
- Test de l'effet d'une source bêta sur un courant d'ions du filament 1.



Courant avec/sans source beta



**Préliminaire**

effet < 2%



## FRIENDS3 test bench

**Heating\_1**

0.05 V

0.01 A

**0.80 V**

**0.00 A**

**Heating\_2**

0.82 V

0.00 A

**0.80 V**

**0.00 A**


**Chamber temperature**

ADC output 148 0-255

ADC voltage 1.92 V

Temperature

17.87 Celsius



**Generator CH1**

Amplitude (pp) 2.57

Frequency 500000.00

Phase 0.00

**Generator CH2**

Amplitude (pp) 0.00

Frequency 500000.00

Phase 0.00

**Proportional controller RF\_REG**

Target value 44.760 V

Gain value -0.0200

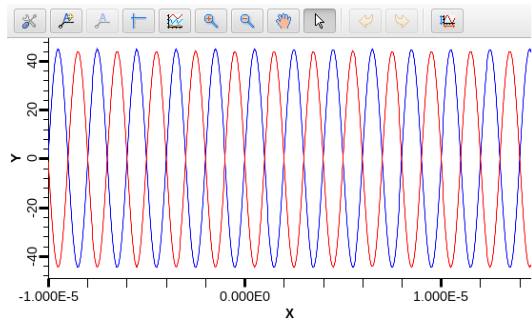
Threshold 0.500 V

Control value 2.570

Regulation ON

DC1	DC2	DC3	DC4
11.990 V	19.990 V	12.000 V	19.990 V
0.0000 A	0.0000 A	0.0000 A	0.0000 A
<b>12.00 V</b>	<b>20.00 V</b>	<b>12.00 V</b>	<b>20.00 V</b>
<b>0.10 A</b>	<b>0.10 A</b>	<b>0.10 A</b>	<b>0.10 A</b>
Off	Off	Off	Off

**Moku\_1**



**Oscilloscope CH1**

Att 10

Ampl 44.70 V

**Oscilloscope CH2**

Att 10

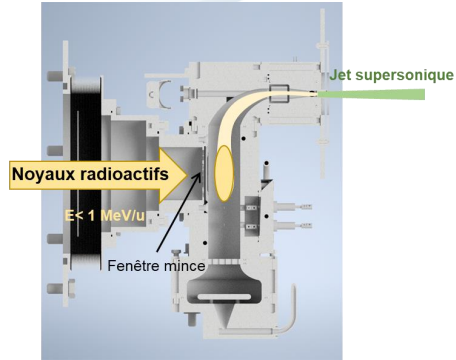
Ampl 44.24 V

PS1	PS2	PS3	PS4
-0.06 V	0.01 V	0.69 V	0.70 V
-0.00 A	0.00 A	0.00 A	0.00 A
<b>0.00 V</b>	<b>0.00 V</b>	<b>0.60 V</b>	<b>0.60 V</b>
<b>0.00 A</b>	<b>0.00 A</b>	<b>0.07 A</b>	<b>0.07 A</b>
On	On	On	On

Detector  
Current 5.339E-13 A

- Développement d'un système de commande et contrôle basé sur EPICS (comme S<sup>3</sup>-LEB)
- Utilisation de Python (pyepics, pycaspy) pour les applications spéciales.





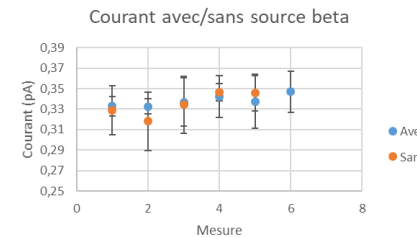
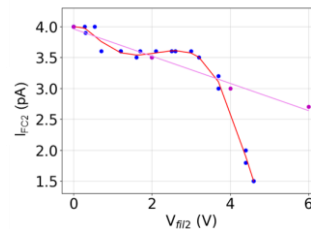
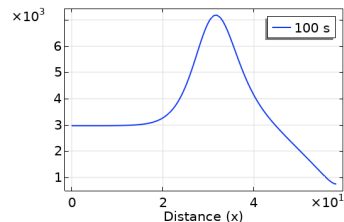
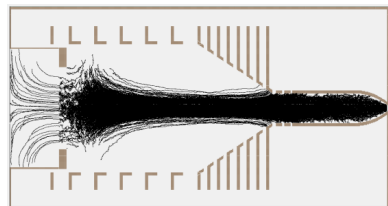
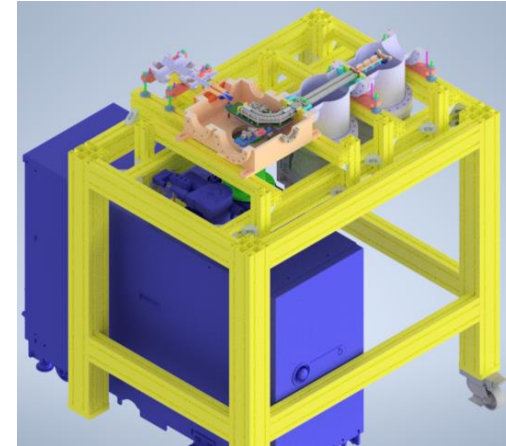
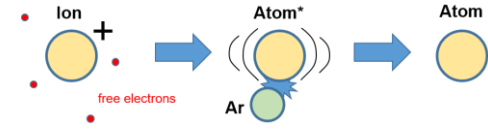
- ❑ FRIENDS<sup>3</sup> est un nouveau projet dédié aux futurs développements de la cellule à gaz de S<sup>3</sup>-LEB
  - Approche multi-phase
  - Intérêt de comprendre les processus de base

- ❑ Le projet est proche de finir le design de son banc de test:
  - Usinage et assemblage jusqu'à mi-2024



- ❑ Premières simulations et tests en cours

- ❑ Le banc de test sera installé au GANIL, permettant de réaliser plus facilement des futurs développements jusqu'au niveau TRL6



- **Equipe FRIENDS<sup>3</sup> @ IJCLab**

Wenling Dong, Serge Franchoo, Thierry Hourat, David Lunney, Vladimir Manea, Enrique Minaya-Ramirez, Elodie Morin, Samuel Roset

- **S3-LEB collaboration**

- **JETRIS collaboration (HIM, JGU Mainz, GSI)**



ANR-21-CE31-0001

