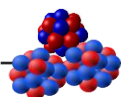


PIPERADE

PIEGES DE PENNING POUR LES RADIOISOTOPES A DESIR

Spiral2 **DESIR**



PURIFICATION
TRAP



MEASUREMENT
TRAP ?

ACCUMULATION
TRAP



*other DESIR
experiment*

Physique du noyau atomique

Études de la structure nucléaire et des interactions entre nucléons



Études **théoriques**

(Groupe Physique Théorique)

→ Compréhension et description de la structure nucléaire par des modèles

comparer des mesures expérimentales aux prédictions des modèles

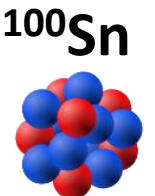
Études **expérimentales**

(Groupe Noyaux Exotiques)

→ Mesure des propriétés de noyaux atomiques dits « **Exotiques** »

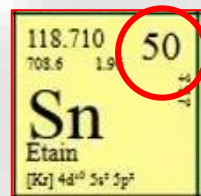
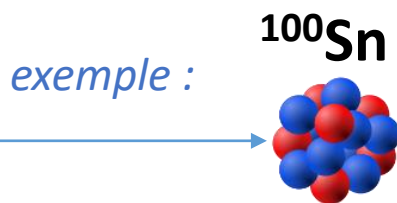
- ☐ Mesures de décroissance
- ☐ Mesures de masse

exemple :

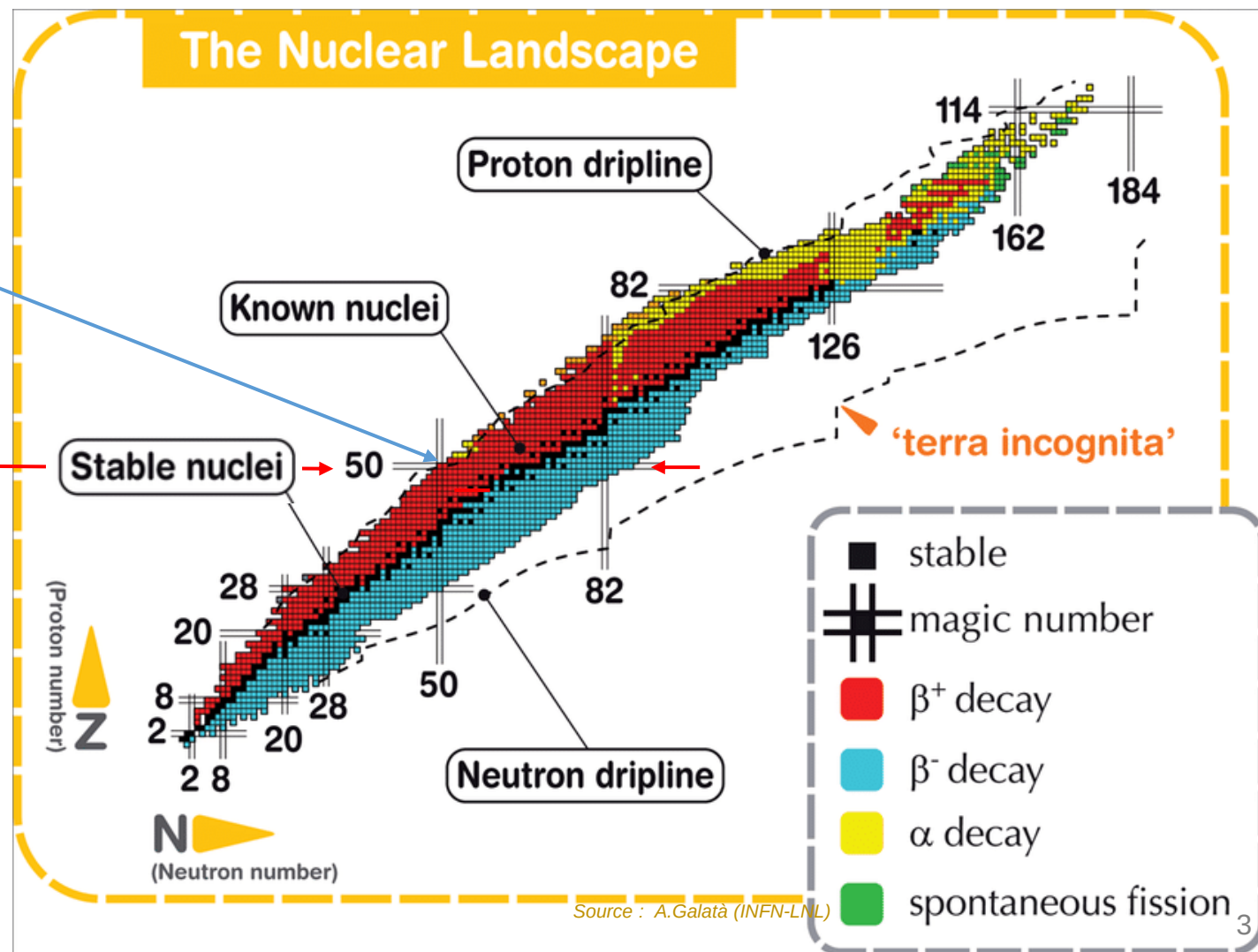


Noyaux Exotiques ?

« Noyaux *Exotiques* » : ils n'existent pas naturellement sur terre.
Ils ne sont produits qu'en laboratoire ou dans les milieux stellaires.



environ **288** noyaux d'atomes stables existent à l'état naturel. ■
plus de **3000** ont été observés en laboratoire ■ ■ ■
plus de **4000** restent à découvrir ...



Où mesurer ces noyaux exotiques ?

Ils sont produits par une dizaine d'installations au monde ...



Lieux d'Expériences menées par le groupe Noyaux Exotiques :



Université de **Jyväskylä**

RIKEN Nishina Center



ISOLDE @ CERN

@ GANIL (Caen)



1983 : 1^{ers} faisceaux d'ions stables
délivrées aux physiciens

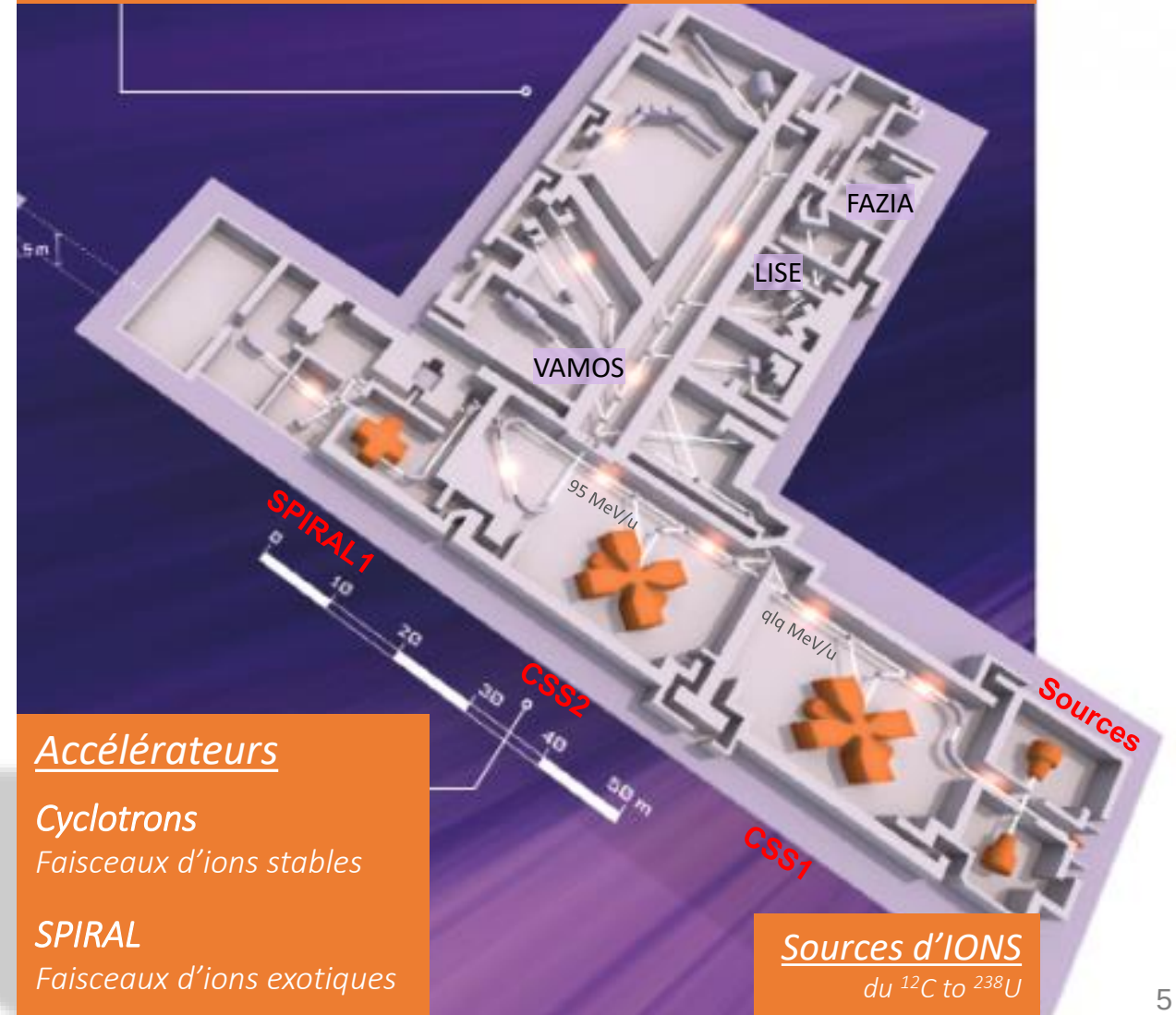
2001 : 1^{ers} faisceaux d'ions exotiques
fournis par **SPIRAL**

SPIRAL

Système de Production d'Ions RadioActifs en Ligne

Hall d'expérimentations

Étude des propriétés des noyaux exotiques



Accélérateurs

Cyclotrons

Faisceaux d'ions stables

SPIRAL

Faisceaux d'ions exotiques

Sources d'IONS

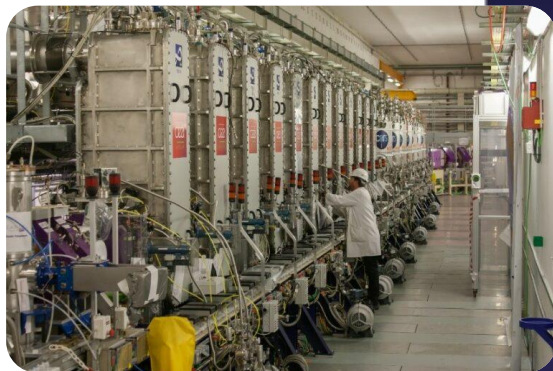
du ^{12}C to ^{238}U

SPIRAL2 *Accélérateur Linéaire Supraconducteur*

NFS : Neutron For Science

S³ : Super Separator Spectrometer

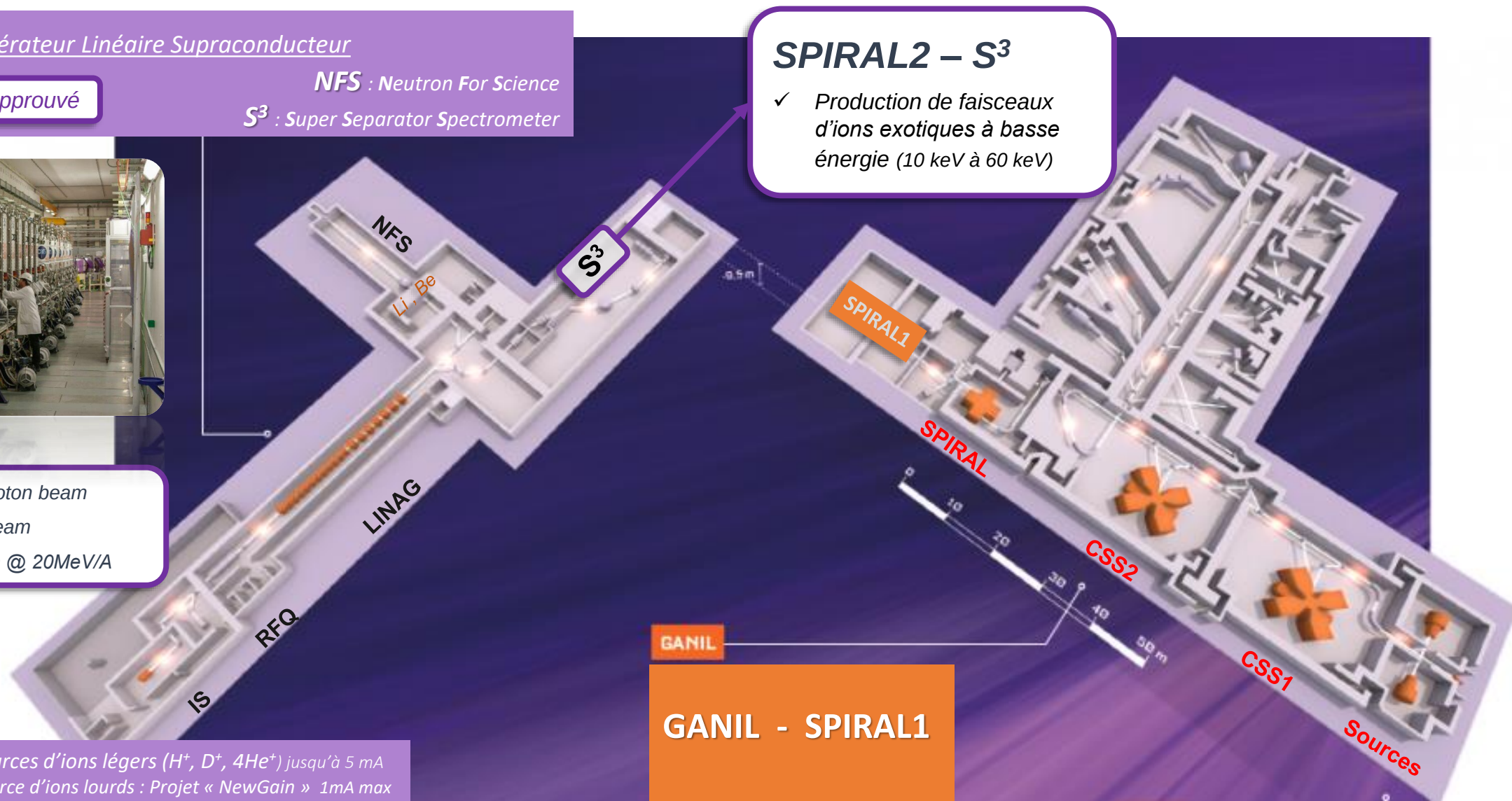
✓ 2005 : Projet approuvé



2019 : first 33 MeV proton beam
2020 : NFS Neutron beam
2021 : 200 μ A d'Alpha @ 20MeV/A

SPIRAL2 – S³

✓ Production de faisceaux d'ions exotiques à basse énergie (10 keV à 60 keV)



Sources d'ions légers (H^+ , D^+ , $4He^+$) jusqu'à 5 mA
Source d'ions lourds : Projet « NewGain » 1mA max

GANIL - SPIRAL1

Projet soutenu par **ANR** **DESIR**, accords SPIRAL2 – FAIR (GSI) et **RÉGION NORMANDIE**

SPIRAL2 - S³

Production d'autres *noyaux* que SPIRAL1, en particulier *plus lourds* et *déficients en neutrons*

- Spectroscopie LASER
- Spectrométrie de masse
- Spectroscopie de décroissance

DESIR

Mesures à basse énergie
de *propriétés* des *noyaux exotiques*

Désintégration
Excitation et
Stockage
d'**I**ons
Radioactifs

SPIRAL2 - S³

GANIL - SPIRAL1

GANIL - SPIRAL1

*Noyaux produits par
fragmentation ...*

Mesures de précision @ DESIR

➤ Échantillons (noyaux d'intérêt) doivent être « **ultra-purs** »

- **Sélection** des ions d'intérêt
- **Purification** du faisceau d'ions
- **Mesure de masse** des noyaux



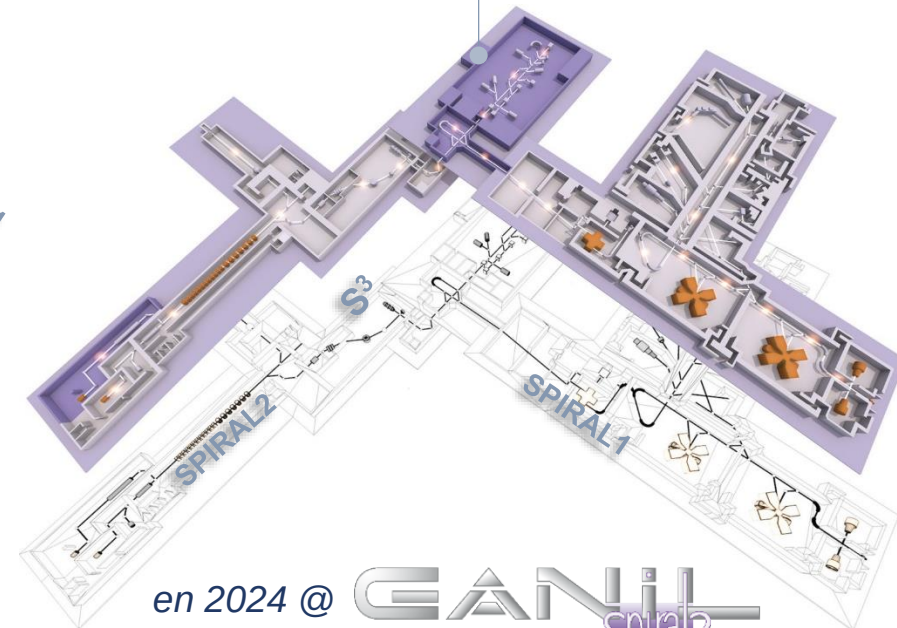
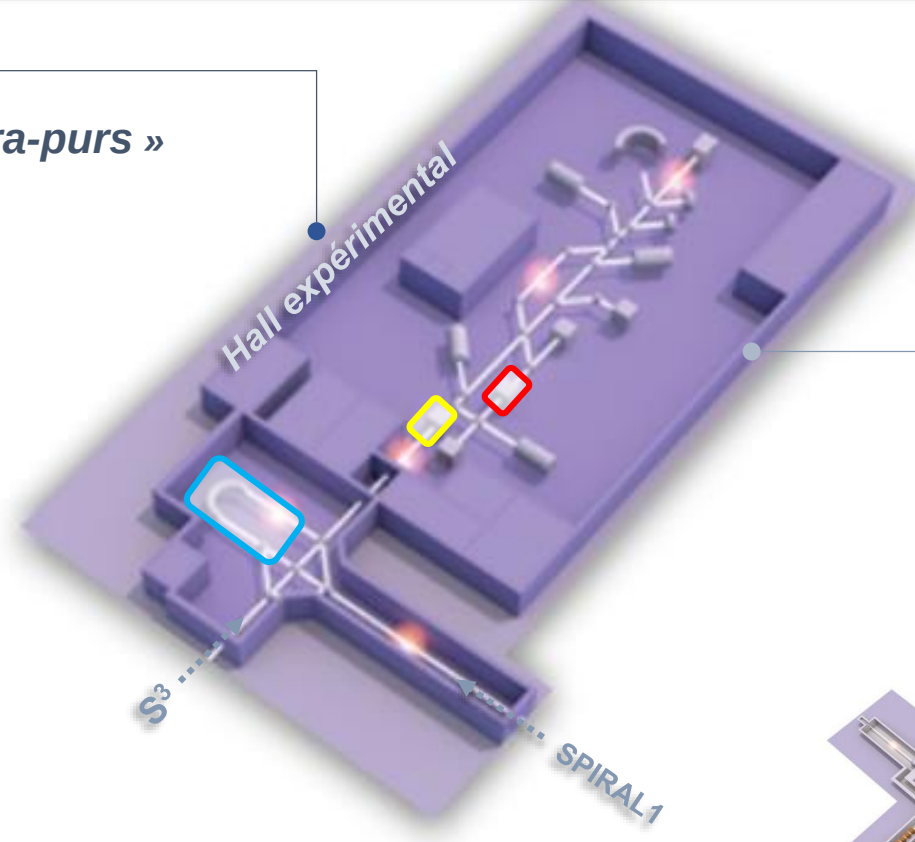
❑ le High Resolution Separator **HRS**

❑ le RFQ - Cooler - Buncher **GPIB**
(General Purpose Ion Buncher)

❑ le double piège de Penning **PIPERADE**
(Pièges de Penning pour les RADio-isotopes de DESir)

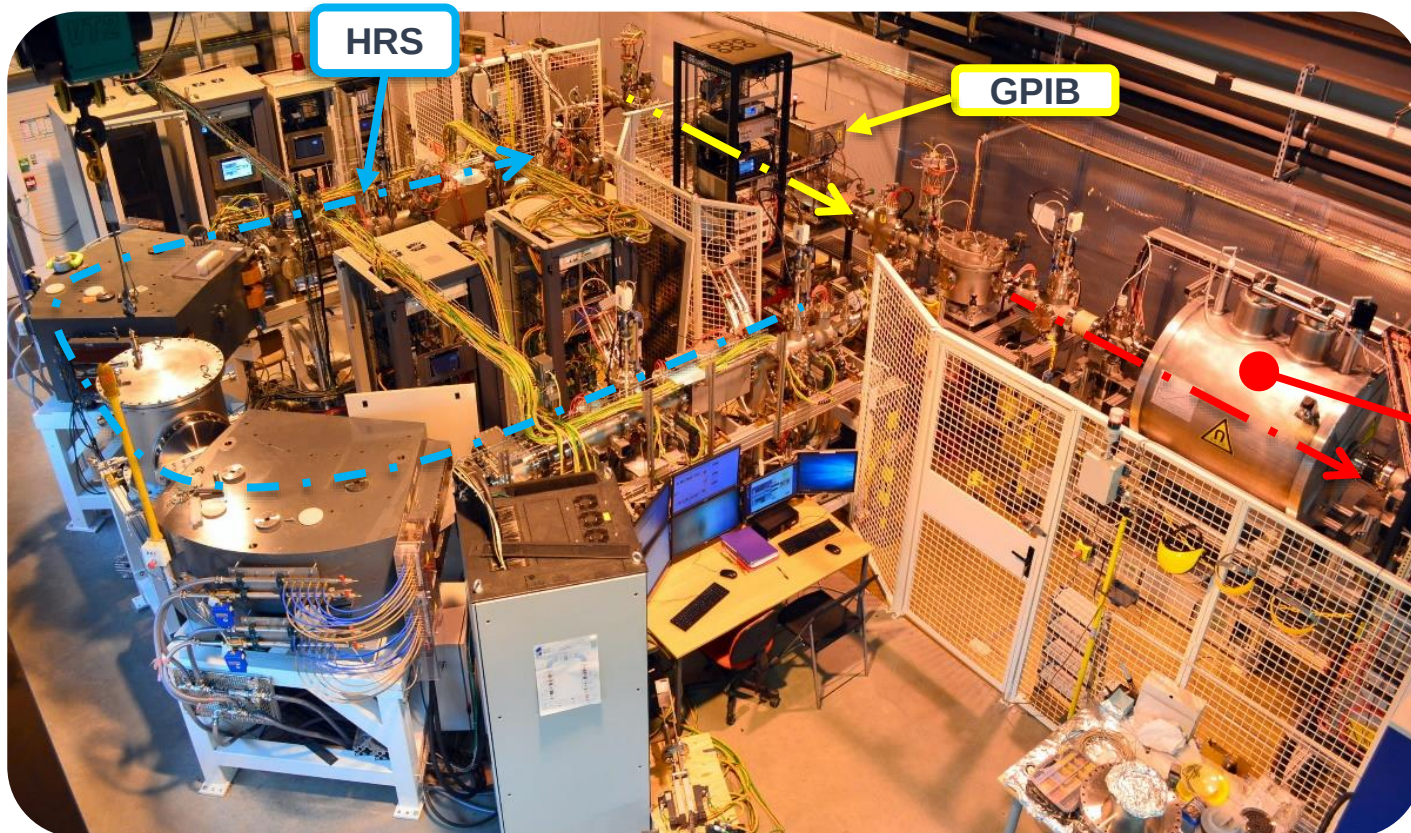
❑ DESIR Control System (CS) **EPICS**

❑ LIGNES de transfert DESIR (hors mécanique)



en 2024 @ **GANIL**
laboratoire commun CEA/DRF
Caen, France
Spiral2 CNRS/IN2P3

Aujourd'hui @



1. le High Resolution Separator

HRS

Julien Michaud @ 12h20

2. le RFQ - Cooler - Buncher

GPIB

Audric Husson @ 11h40

3. Le double piège de Penning

PIPERADE

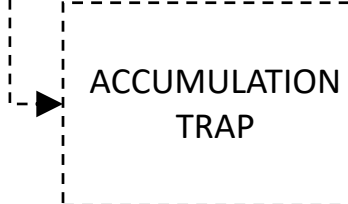
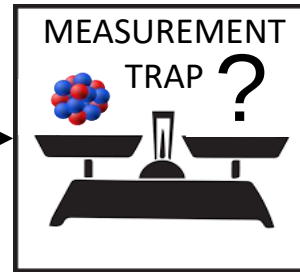
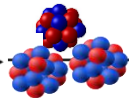
Now !

PIPERADE

PIEGES DE PENNING POUR LES RADIOISOTOPES A DESIR

PIPERADE

PIEGES DE PENNING POUR LES RADIOISOTOPES α DESIR



1^{er} piège

2^{ème} piège

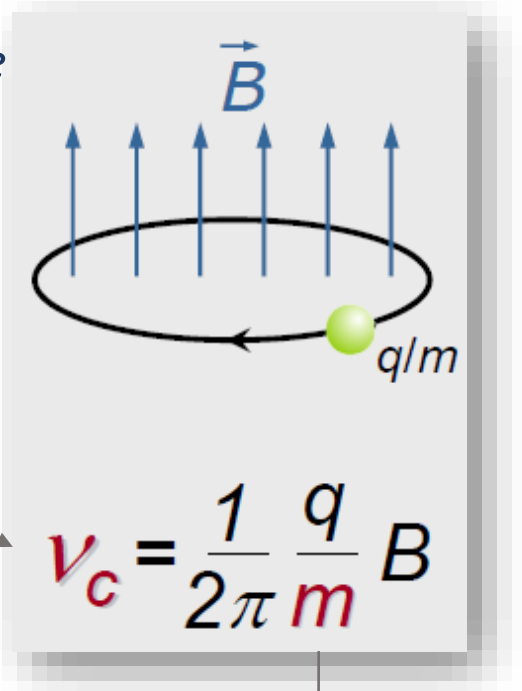


Autre expérience DESIR

Mesure de décroissance
par exemple

Une particule chargée (q) dans un **champ magnétique** statique et uniforme se déplace sur un cercle en raison de la force de Lorentz : $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$

→ La fréquence de rotation dite « **Fréquence Cyclotron** » V_c d'un ion de charge « q » de masse « m » dans un champ « B » est



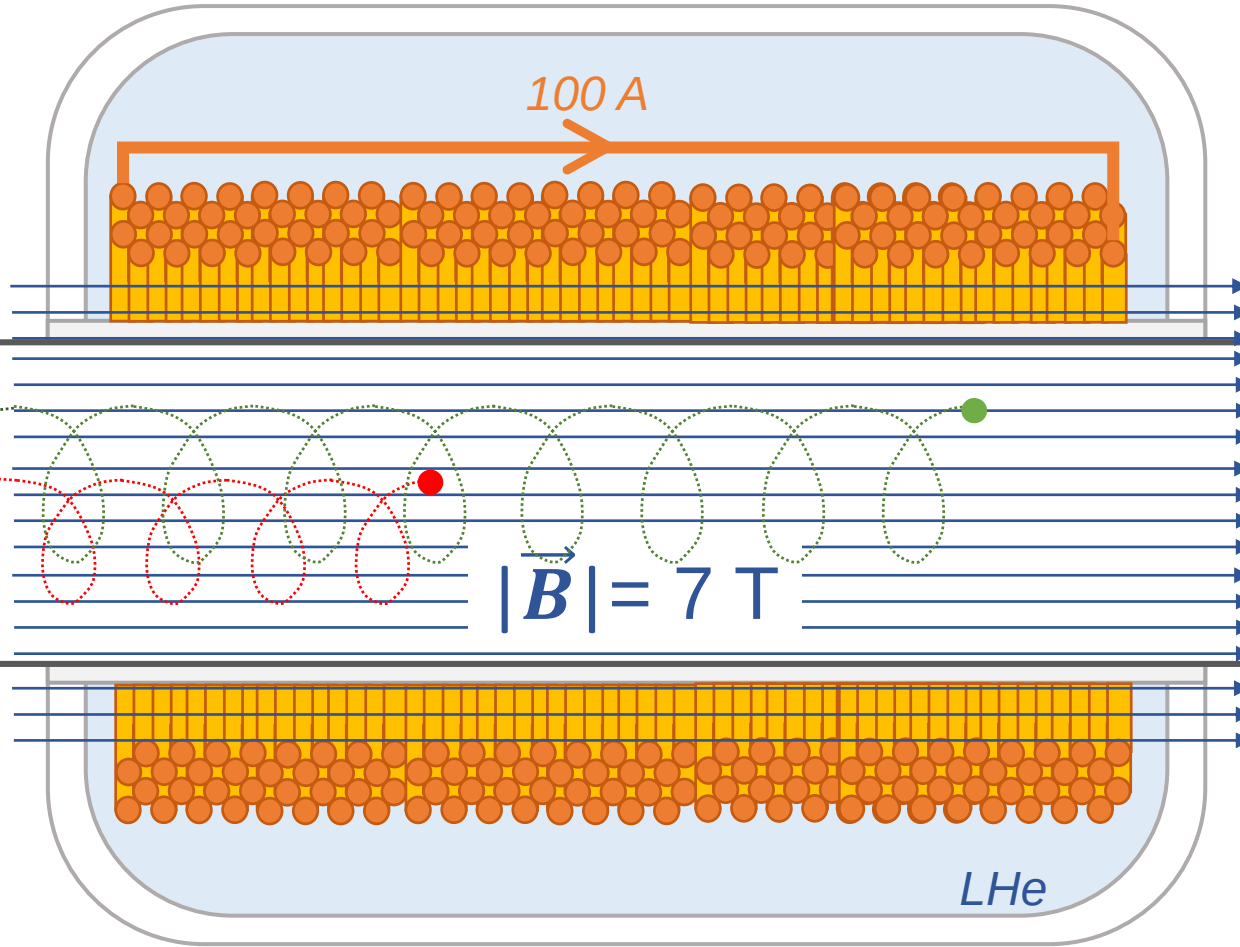
1. Disposer d'un champ magnétique statique Intense et uniforme $\vec{B}$
2. Maintenir (Piéger) le noyau chargé (ion) à étudier dans $\vec{B}$
3. Déterminer précisément la Fréquence de rotation Cyclotron » V_c

masse de l'ion

$\vec{B}$: Confinement Radial des ions

$\vec{B}$: champ magnétique

- ✓ uniforme
- ✓ stable
- ✓ homogène



VIDE (10^{-8} mbar)

VIDE (10^{-8} mbar)



Pompe à vide

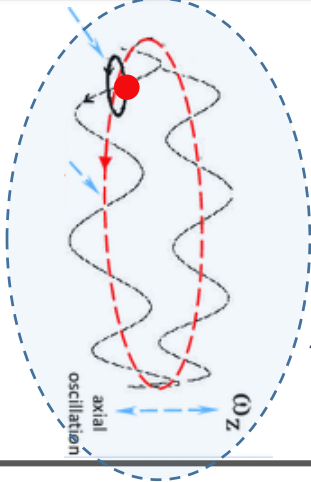


Pompe à vide

Electro-Aimant supraconducteur :
➤ achat CRYOGENICS

➔ CONTRAINTES :

- utiliser des Matériaux AMAGNETIQUES
- depuis Juillet2017 ... Maintien du bobinage Supra en Froid ...



$\vec{B}$: Confinement Radial des ions

$\vec{E}$: Confinement Axial des ions



VIDE (10^{-8} mbar)

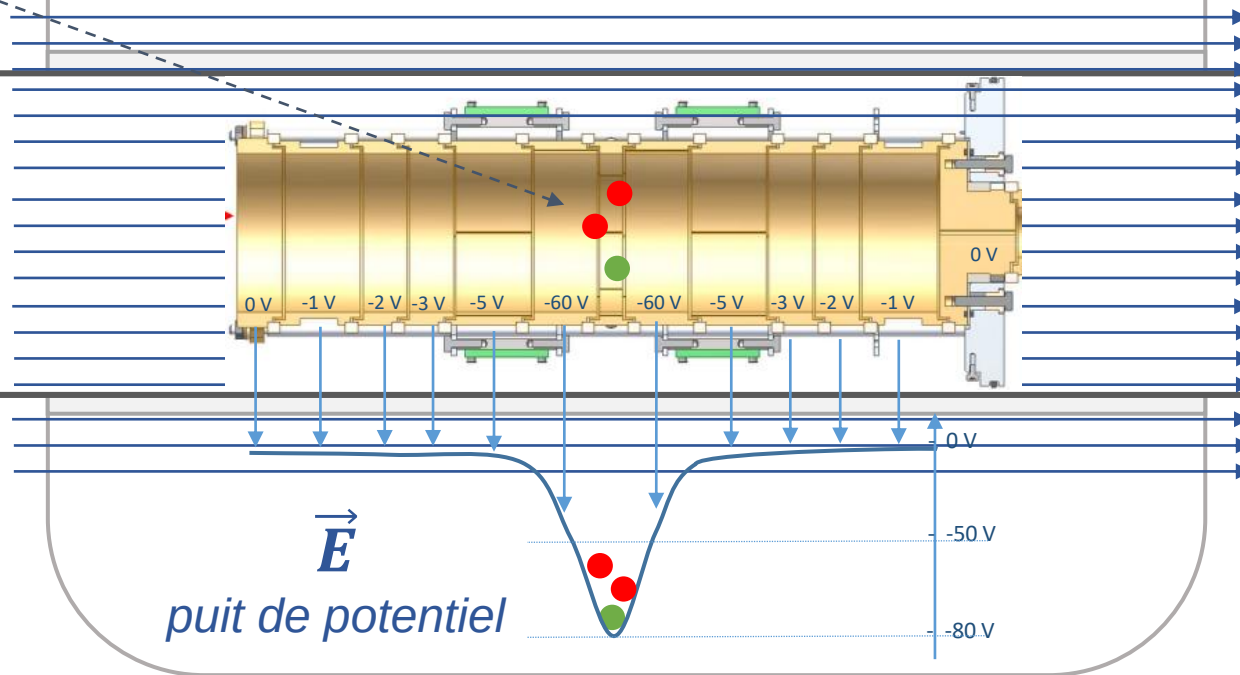
VIDE (10^{-8} mbar)



Pompe à vide



Pompe à vide



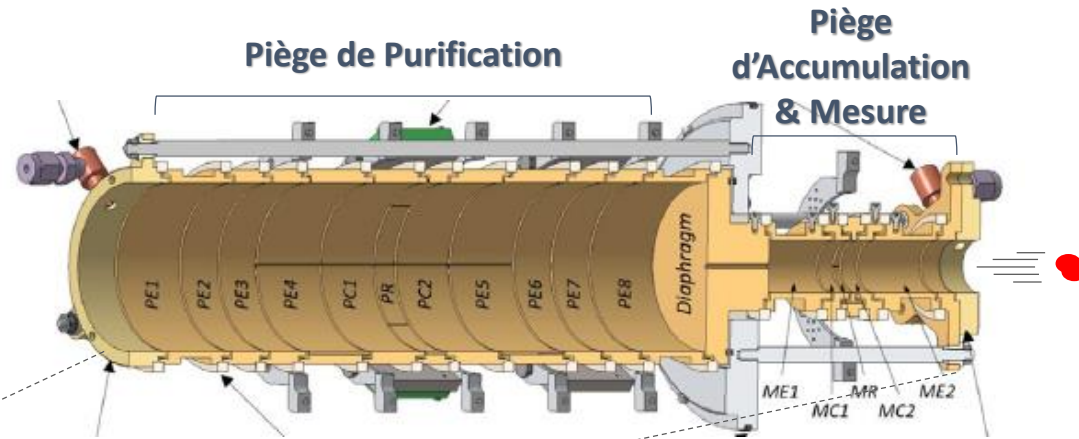
→ les ions sont piégés !

PIPERADE : double piège de Penning

PIÈGES DE PENNING POUR LES RADIOISOTOPES À DESIR

- Noyau d'intérêt @ 30 keV
- + Contaminants

depuis
Spiral1 ou S³



Pièges développés et fabriqués
en collaboration avec le



besoin : 63 Electrodes à Polariser

→ CHAMPS ELECTROSTATIQUE ajustable par l'utilisateur

SOLUTION : 96 voies HT (6 kV à 500 V) dans 1 châssis ISEG :

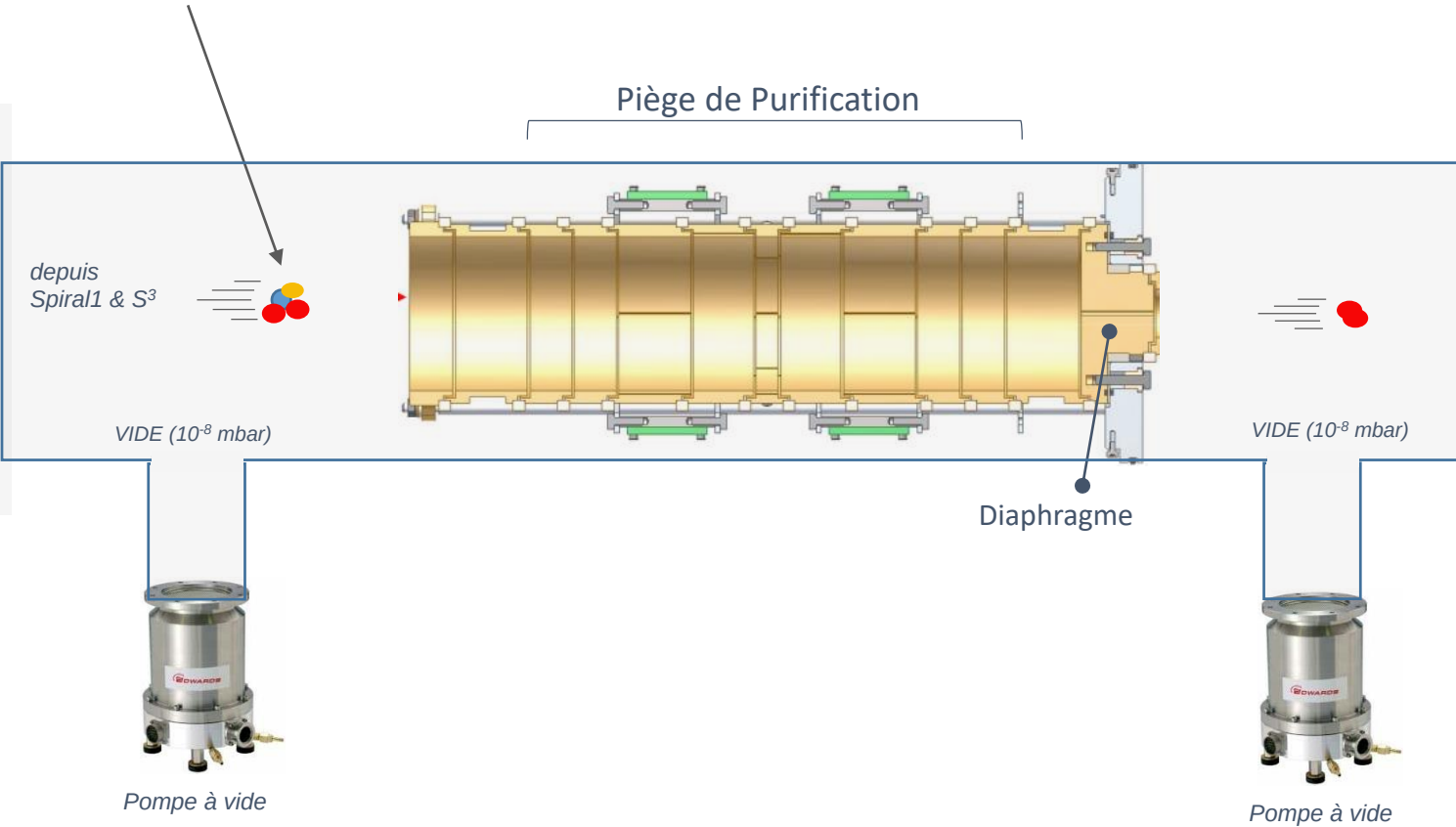
- Ultra-stable et bas bruit
- Haute densité
- Serveur EPICS embarqué



Comment purifier un faisceau d'ions ?

Ions d'intérêt
+ contaminants
@ 30 keV

- Noyau d'intérêt
- Contaminants

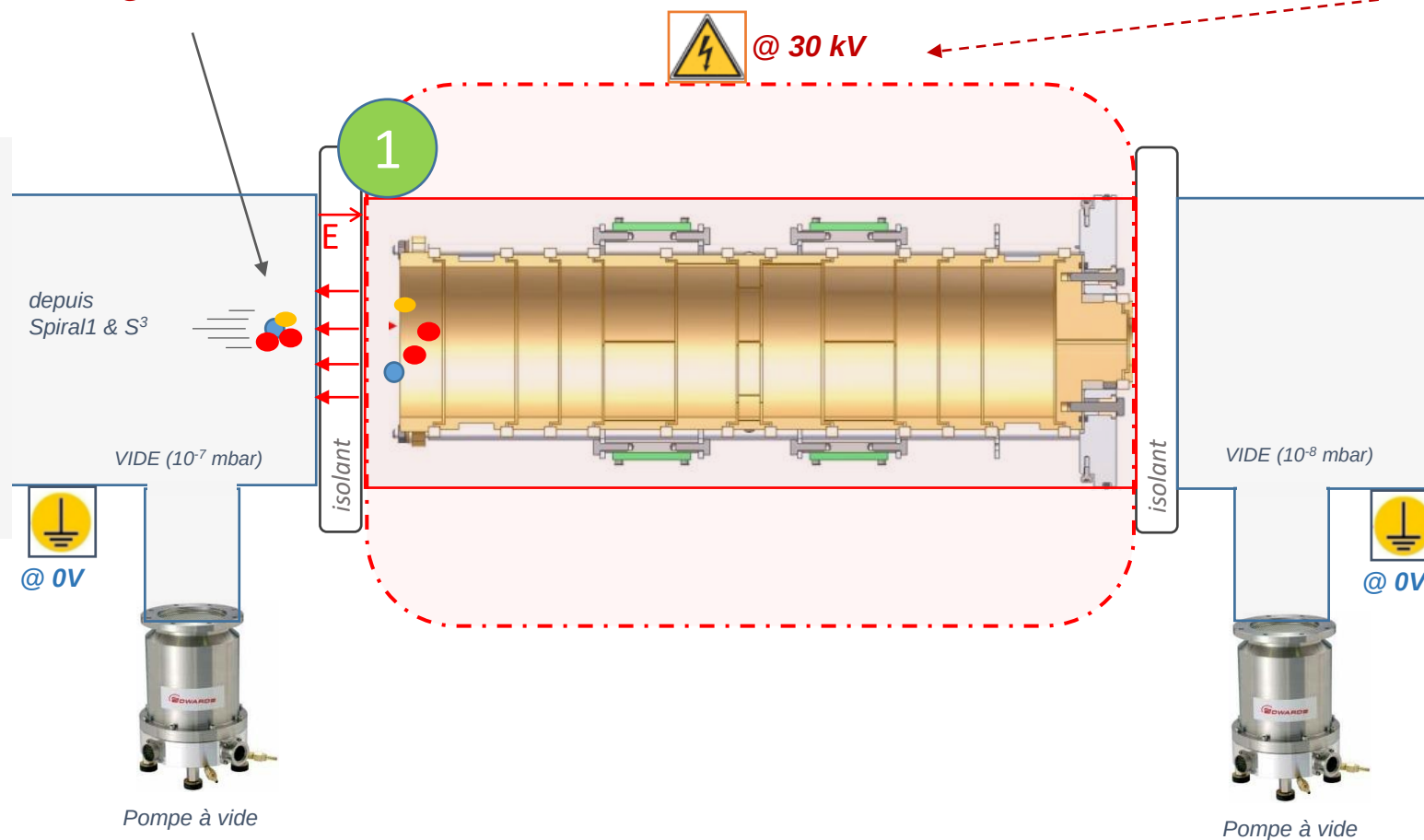


Ions d'intérêt
+ contaminants
@ 30 keV

- Noyau d'intérêt
- Contaminants

Ensemble du piège porté à 30 kV

Champ électrostatique ralentisseur
en entrée de piège



Ions d'intérêt
+ contaminants
@ 30 keV

● Noyau d'intérêt
● Contaminants

Ensemble du piège porté à 30 kV

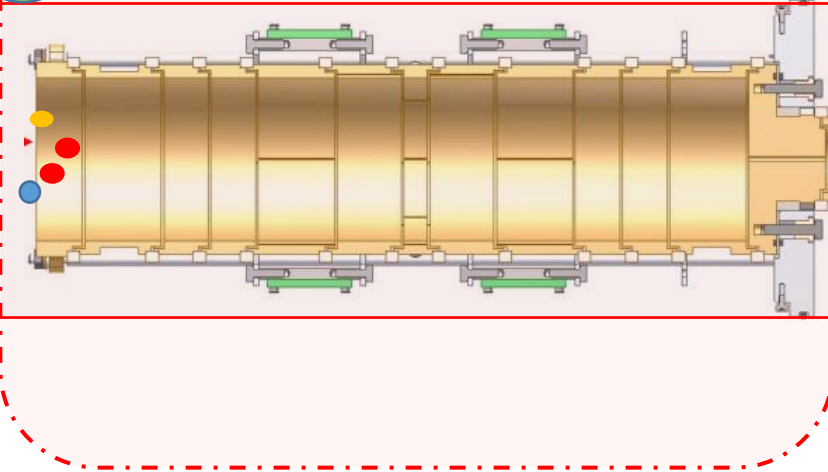
Champ électrostatique ralentisseur
en entrée de piège



@ 30 kV

1

E
isolant



isolant

VIDE (10^{-8} mbar)

@ 0V



Pompe à vide

VIDE (10^{-7} mbar)



@ 0V



Pompe à vide

Contrainte :

Développements sur PLATEFORME HT 30 kV

- Electroniques embarqués à la HT
- Transformateurs d'isolements
- Communication par F/O
- Le tout éloigné de l'aimant

Principe d'un piège de Penning

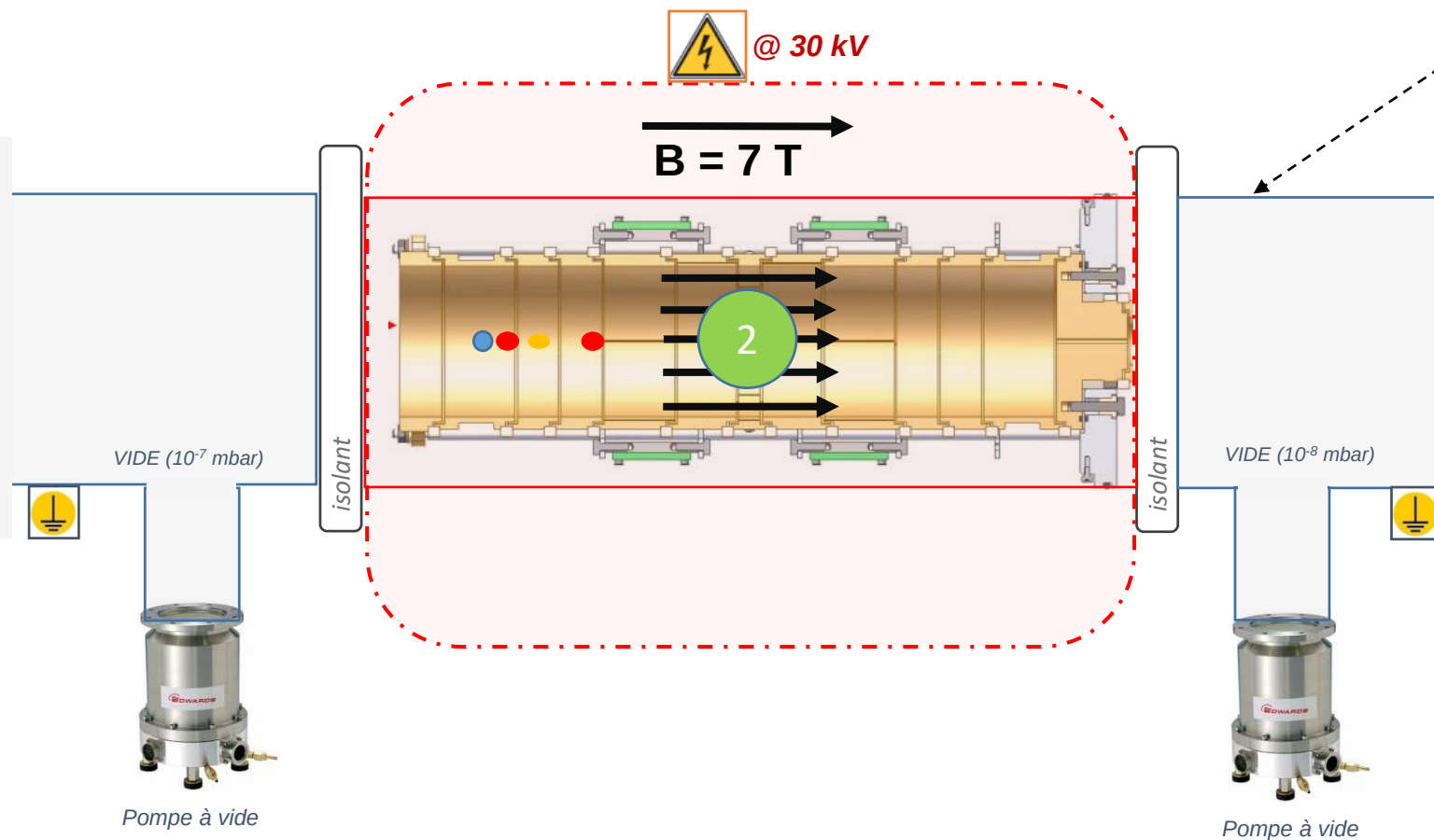
- Noyau d'intérêt
- Contaminants

INJECTER et RALENTIR les ions:

Ralentir les ions jusqu'à arrêt total 1

PIÉGER les ions au centre:

Confinement radial : champ magnétique intense 2

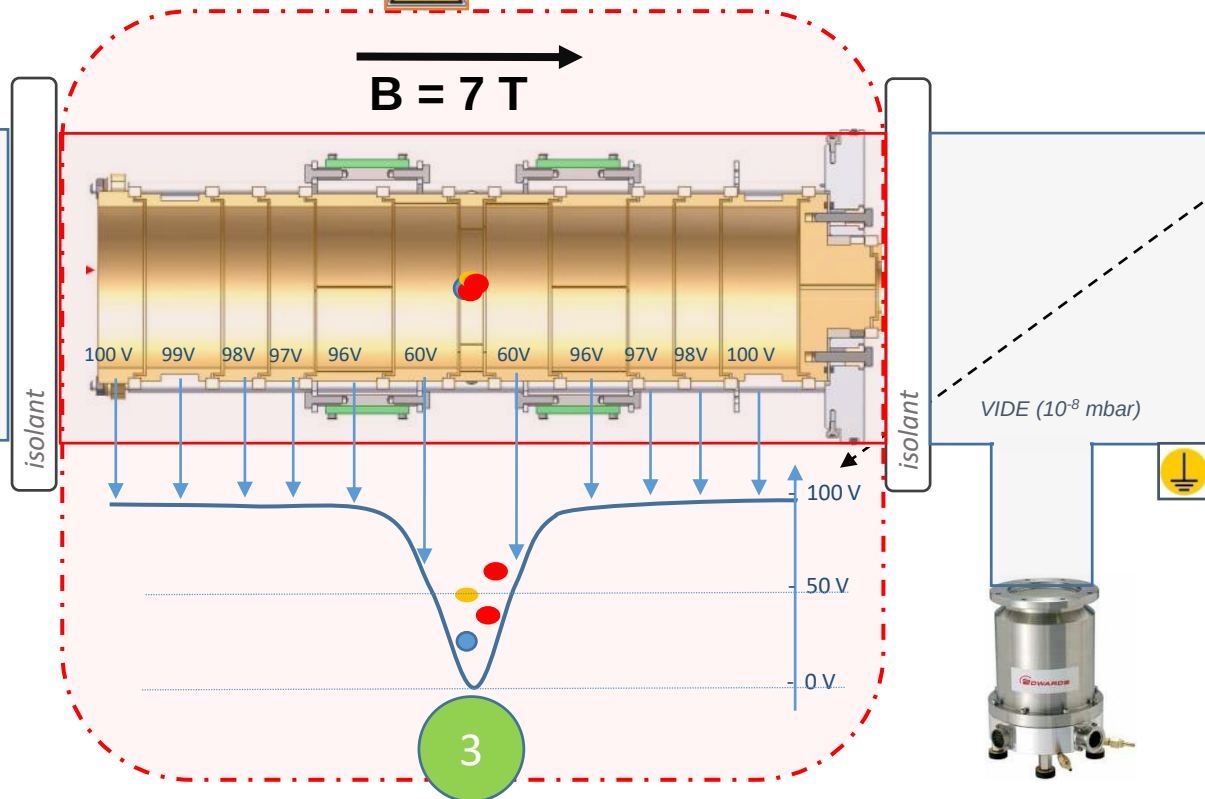


Principe d'un piège de Penning

- Noyau d'intérêt
- Contaminants

 @ 30 kV

$B = 7 \text{ T}$



Pompe à vide

Pompe à vide

INJECTER et RALENTIR les ions:

Ralentir les ions jusqu'à **arrêt total** 1

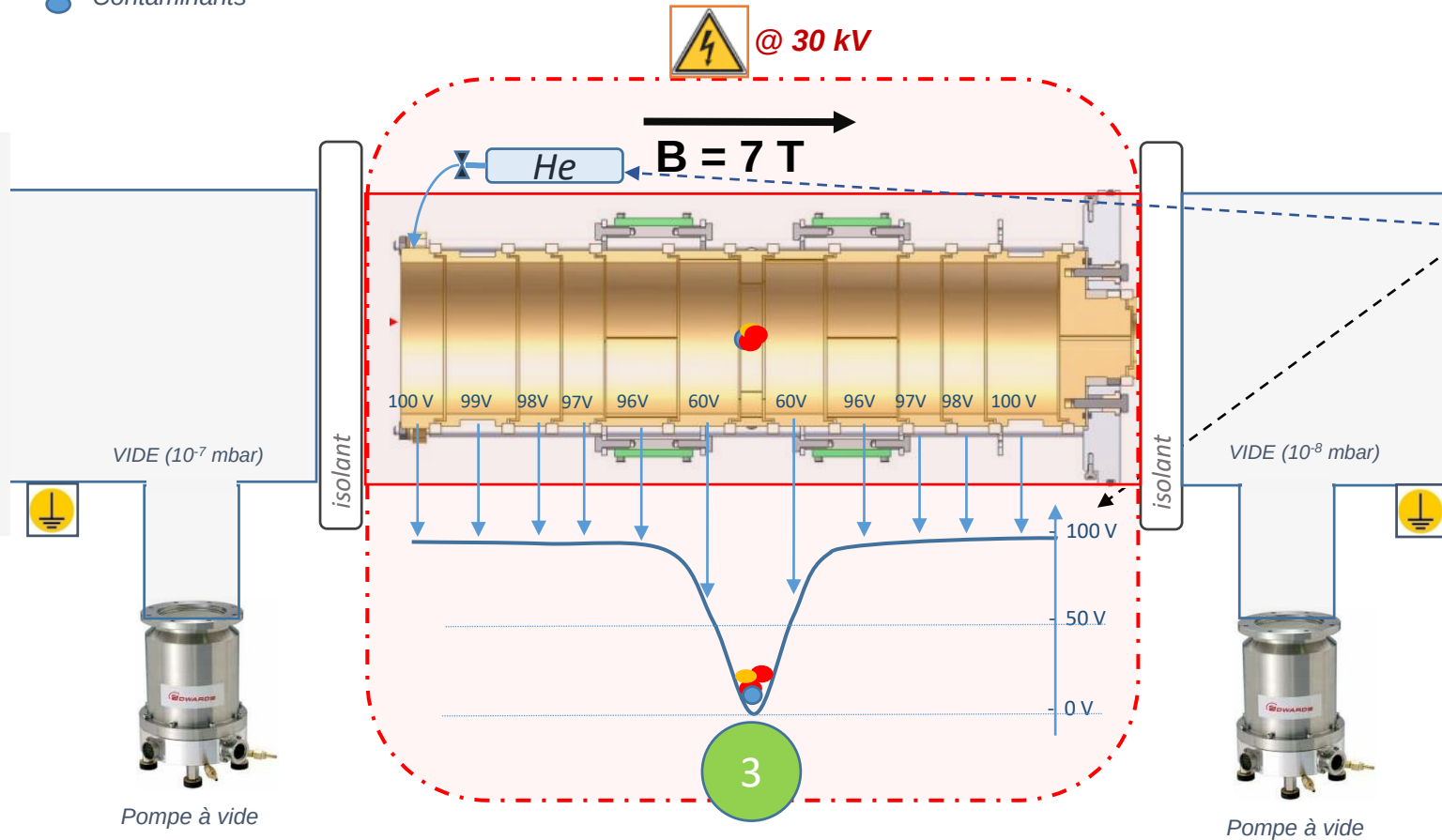
PIÉGER les ions au centre:

Confinement radial : champ magnétique intense 2

Confinement axial : puits de potentiel 3

Principe d'un piège de Penning

- Noyau d'intérêt
- Contaminants



INJECTER et RALENTIR les ions:

Ralentir les ions jusqu'à **arrêt total** 1

PIÉGER les ions au centre:

Confinement radial : champ magnétique intense 2

Confinement axial : puits de potentiel 3

Injecter localement du GAZ (He)

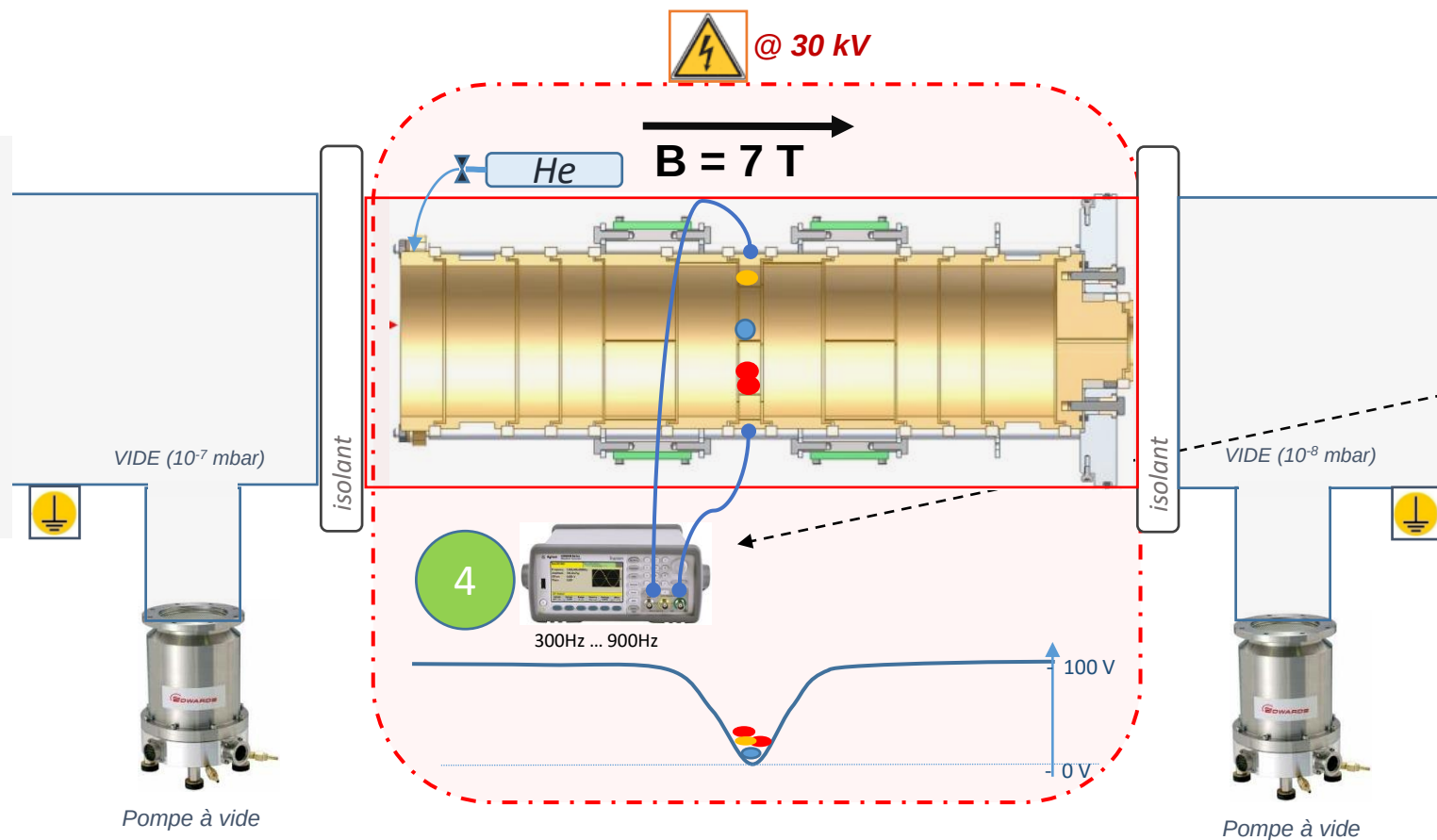
Solution :

- 1 Bouteille d'He HP
- débitmètre massique de Brooks
- Tuyauterie INOX extérieur
- Tuyau PEEK interne (sous vide)

Embarqués sur plateforme HT

Principe d'un piège de Penning

- Noyau d'intérêt
- Contaminants



INJECTER et RALENTIR les ions:

Ralentir les ions jusqu'à **arrêt total** 1

PIÉGER les ions au centre:

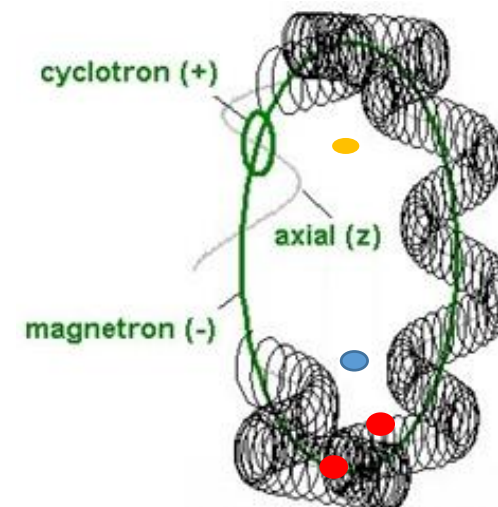
Confinement radial : champ magnétique intense 2

Confinement axial : puits de potentiel 3

SEPARER les ions:

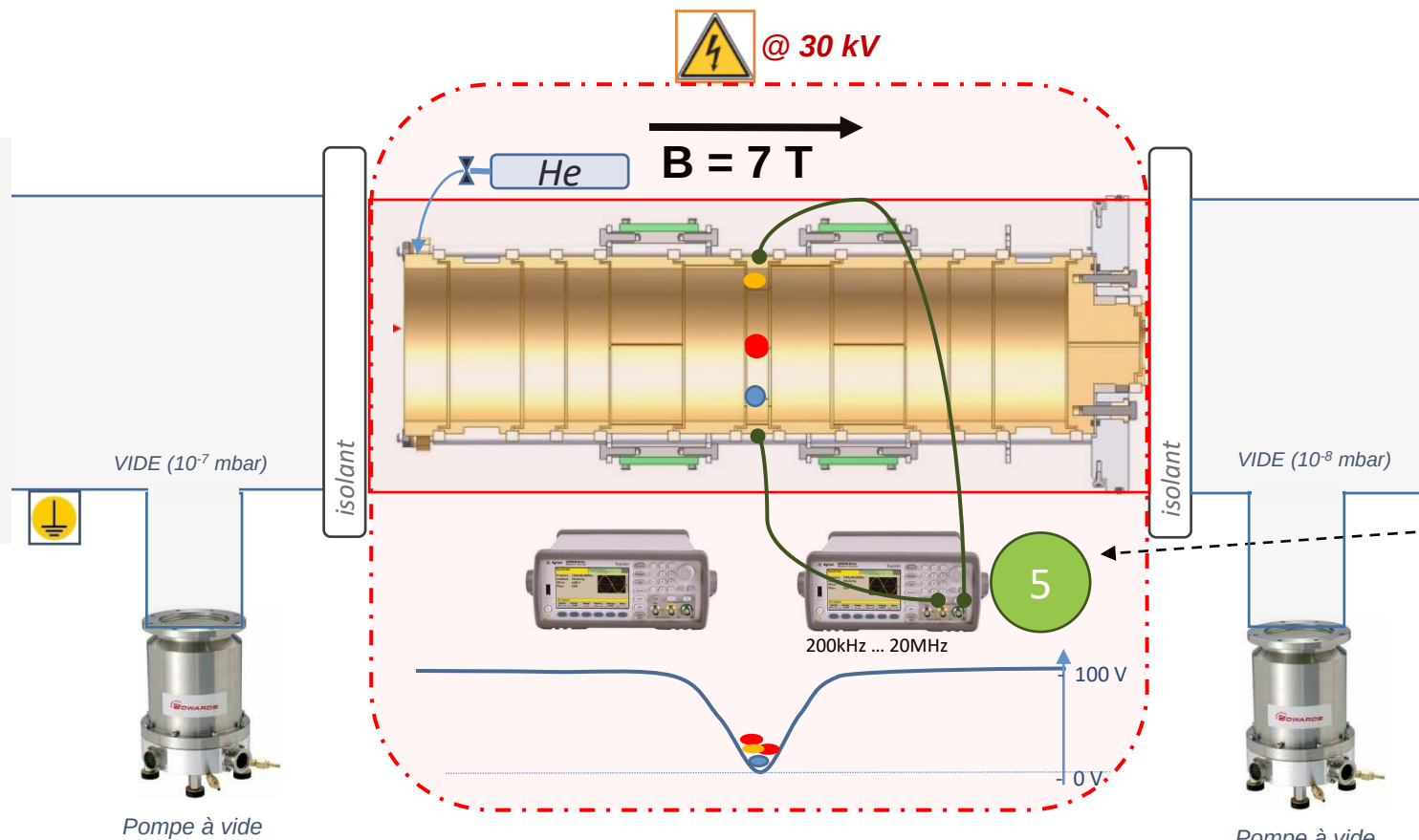
Excitation RF magnétron 4

qui amplifie leur mouvement propre hors axe



Principe d'un piège de Penning

- Noyau d'intérêt
- Contaminants



INJECTER et RALENTIR les ions:

Ralentir les ions jusqu'à **arrêt total** 1

PIÉGER les ions au centre:

Confinement radial : champ magnétique intense 2

Confinement axial : puits de potentiel 3

SEPARER les ions:

Excitation RF magnétron 4

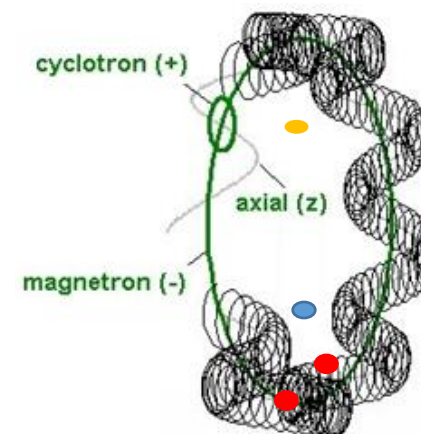
RECENTRER les ions d'intérêt:

Excitation RF cyclotron 5

+ gaz tampon

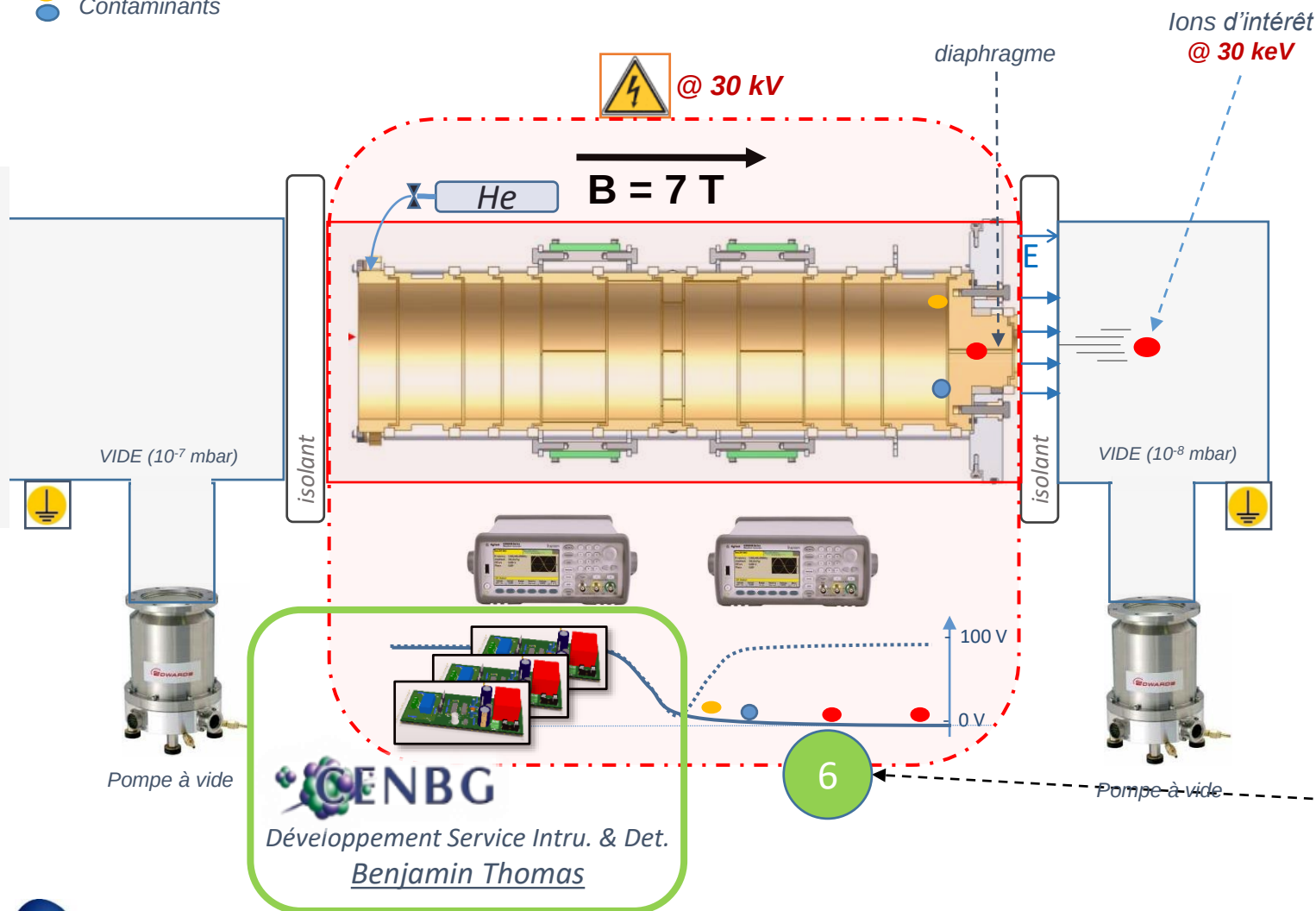
- Conversion de mouvement

- Ions d'intérêt recentrés



Principe d'un piège de Penning

- Noyau d'intérêt
- Contaminants



INJECTER et RALENTIR les ions:

Ralentir les ions jusqu'à **arrêt total** 1

PIÉGER les ions au centre:

Confinement radial : champ magnétique intense 2

Confinement axial : puits de potentiel 3

SEPARER les ions:

Excitation RF magnétron 4

RECENTRER les ions d'intérêt:

Excitation RF cyclotron quadripolaire 5

+ gaz tampon

- Conversion de mouvement

- Ions d'intérêt recentrés

EXTRAIRE les ions d'intérêt:

Ouverture « rapide » du puit de potentiel 6

Pulse Pattern Generator (PPG)

INJECTER et **RALENTIR** les ions:

Ralentir les ions jusqu'à arrêt total

PIÉGER les ions au centre:

Confinement radial : champ magnétique intense

Confinement axial : puits de potentiel

SEPARER les ions:

Excitation RF magnétron

RECENTRER les ions d'intérêt:

Excitation RF cyclotron quadripolaire

+ gaz tampon

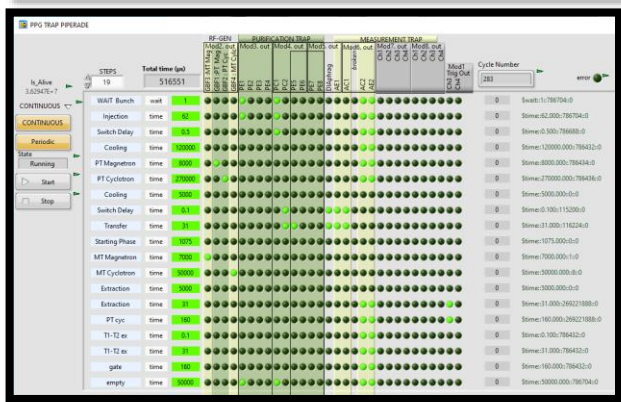
- Conversion de mouvement

- Ions d'intérêt recentrés

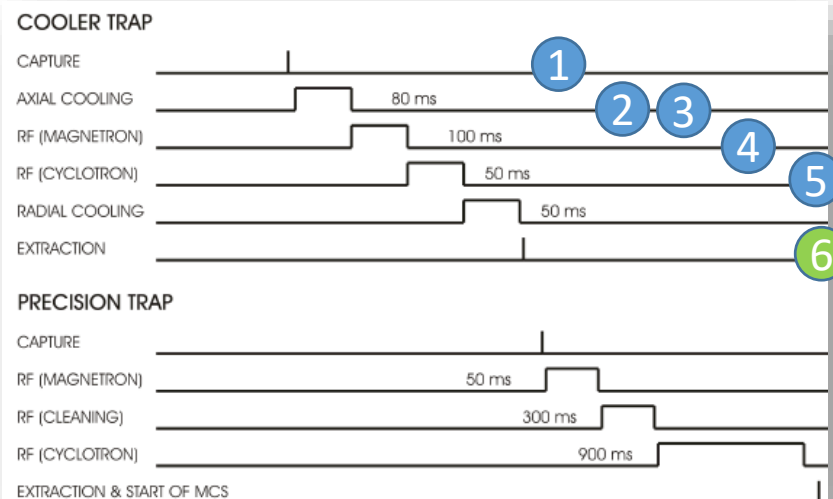
EXTRAIRE les ions d'intérêt:

Ouverture « rapide » du puits de potentiel

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6



OPI

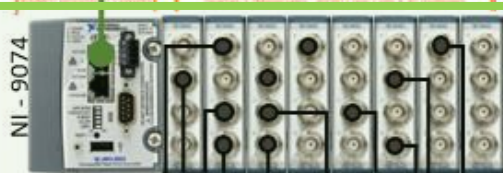


(Channel Access)

Real-time
Operating System

Programmable
FPGA

PPG
IOC
EPICS
server
(Linux PC)

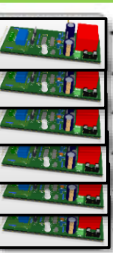


Développement Service Intru. & Det.
L. Daudin

**PPG sur
CompactRIO (*)**

IONS
Injection
Transfert
Extraction

High Voltage switches

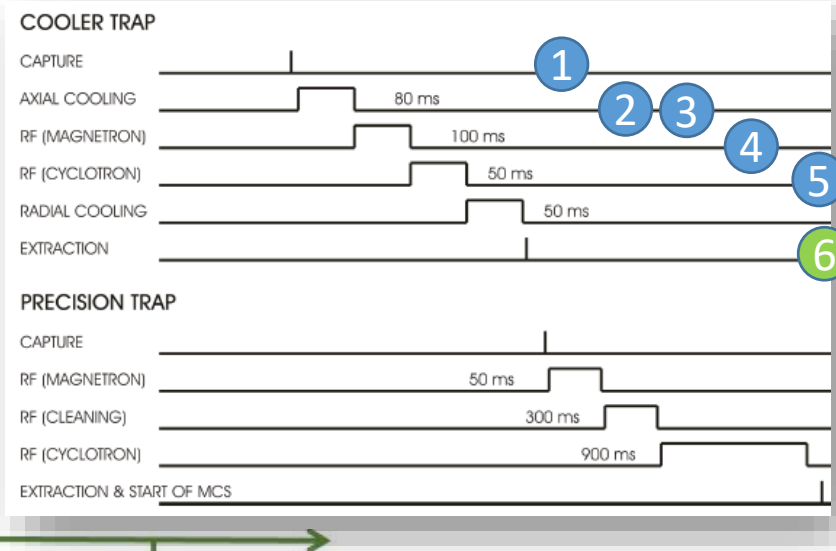


RF Generators

IONS
Excitations

(*) « A new PPG based on Labview FPGA » - F. Ziebler et al. / NIM A 679 (2012) 1-6 3

Pulse Pattern Generator (PPG)

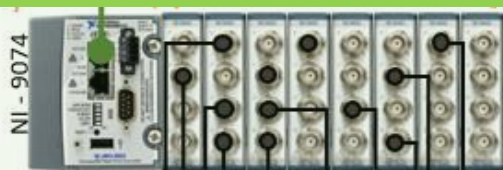


(Channel Access)

Real-time
Operating System

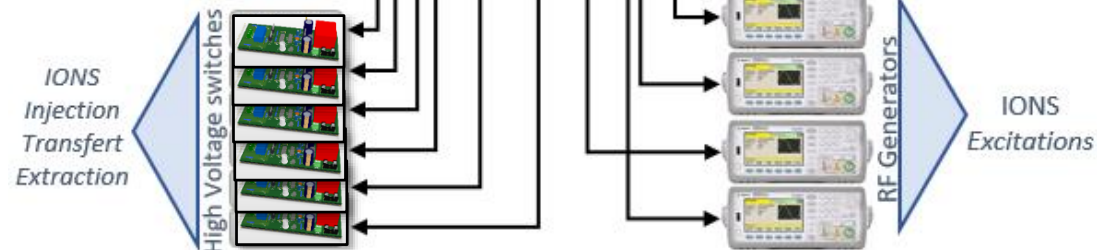
Programmable
FPGA

PPG
IOC
EPICS
server
(Linux PC)



Développement Service Intru. & Det.
L. Daudin

PPG sur
CompactRIO (*)



CompactRIO c'est quoi ?

« Couteau Suisse » d'Instrumentaliste
(National Instruments)

- OS Temps réel (VxWorks) + **FPGA**
- Grande Variété de Modules d'E/S
 - E/S Analogiques (1MSample/s Max)
 - E/S numériques (10 ns)
 - Relais ...
- Châssis Compact, Robuste, Versatile ...
- Programmation LabVIEW (FPGA compris)
- Communication via Ethernet

(*) « A new PPG based on Labview FPGA » - F. Ziebler et al. / NIM A 679 (2012) 1-6 3

1^{ère} Mesure nécessaire : Comptage d'ions

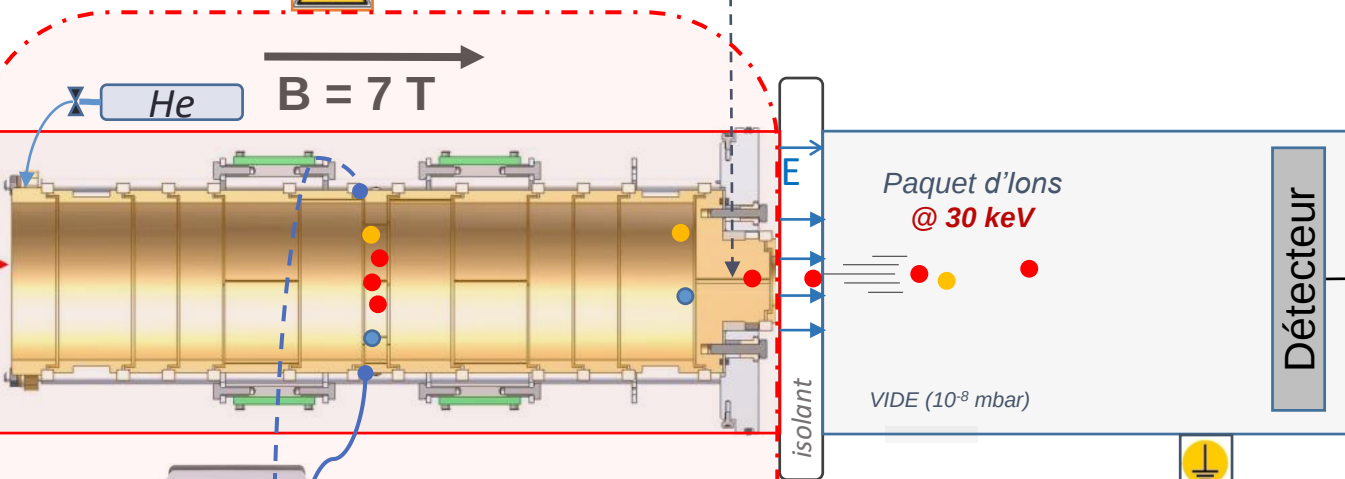
● Noyau d'intérêt

● Contaminants

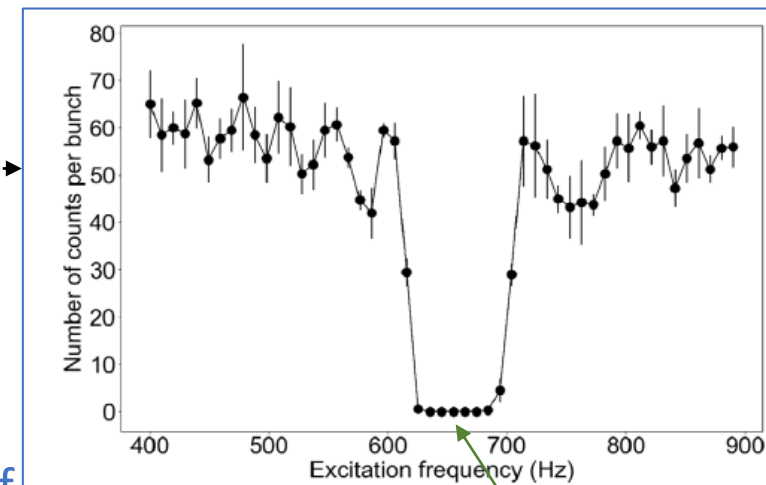


@ 30 kV

diaphragme

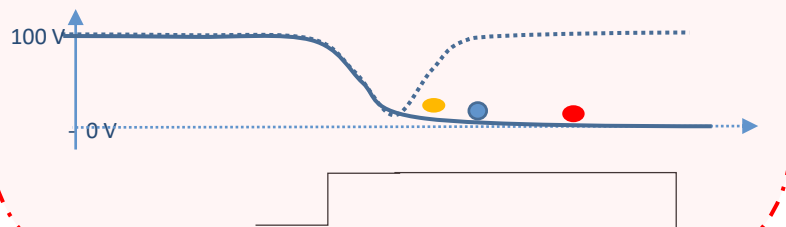
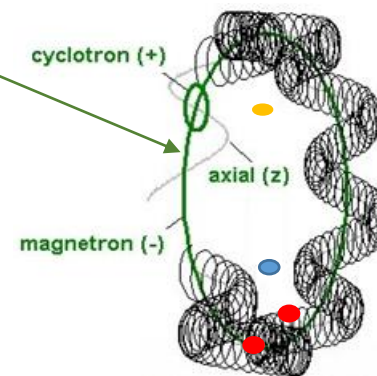


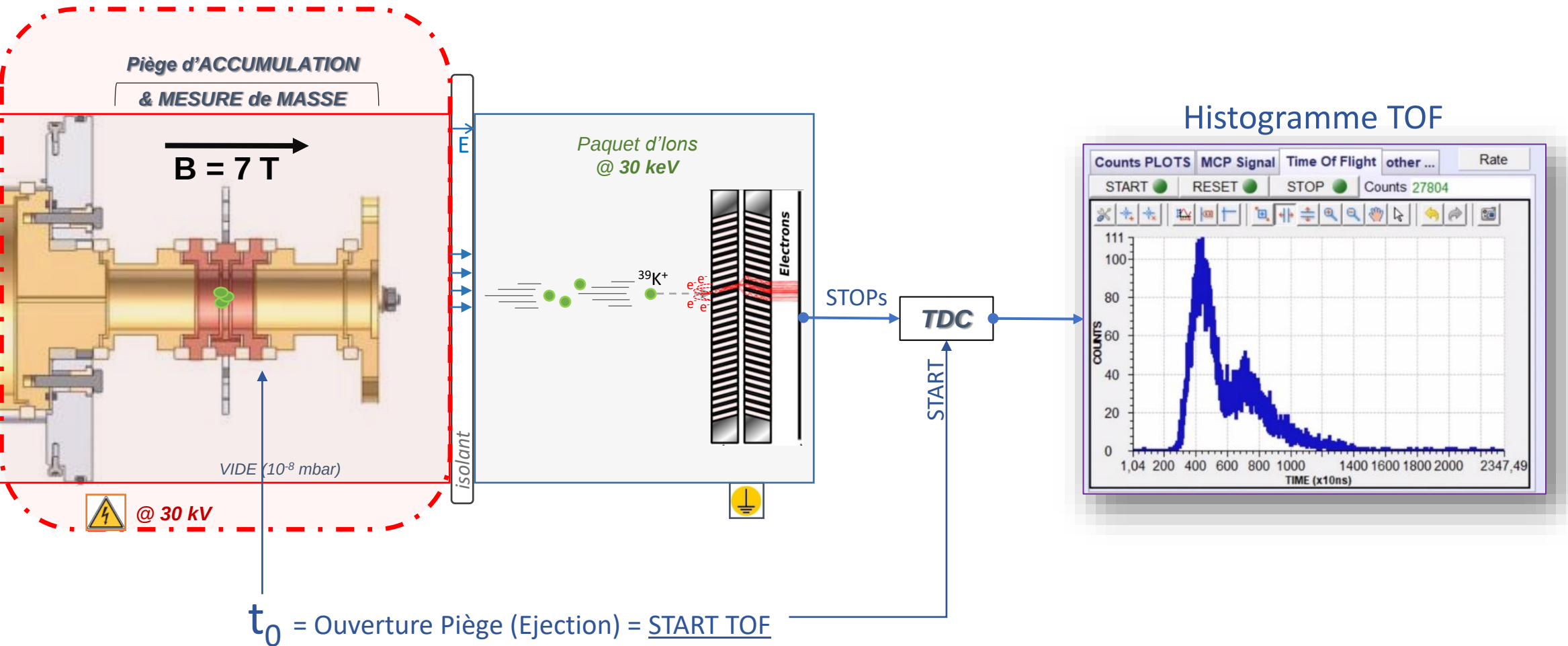
Exemple 1 : Réglage excitation Magnétron



f magnétron

→ Rayon mouvement magnétron > rayon Diaphragme





2008 ... 2011 - μ Faisceau AIFIRA

CRionScan (*) développé pour :

- Balayage rapide : Imagerie & Irradiation Ciblée
- Mesure d'intensité Faisceau sur cible
- Gestion « Beam Gate » : Dose contrôlée ...
- COMPTAGE d'e⁻ → Images Electroniques

2011...13 : **Projet PIPERADE** hérite des développements AIFIRA

CompactRio(s) utilisés pour :

- Mesure d'Intensité CF Faisceau Continu
- Buncher GPIB : 1^{ère} version **PPG** : Résolution 10 ns
- COMPTAGE et TOF par MCP

2015 : PPG « GSI Firmware »

- testé et adopté pour :

- ☐ GPIB : PPG Buncher
- ☐ PIPERADE : PPG Traps

Programmable Timing Sequence

→ Pulse Pattern Generator (PPG)

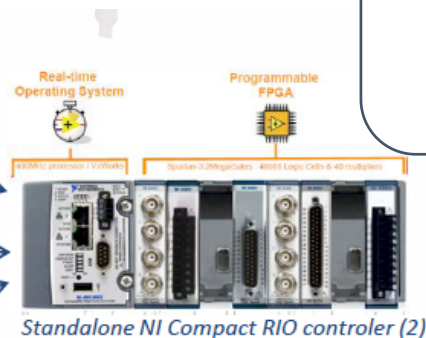
MCP Detection

→ Counting & Time of flight

Faraday Cup

→ Current Measurement

SHIPTRAP & ISOLTRAP
RIO PPG software on



Présenté en 2016 @ GSI CS-Framework Workshop (Darmstadt)

2019 : Redpitaya boards ...

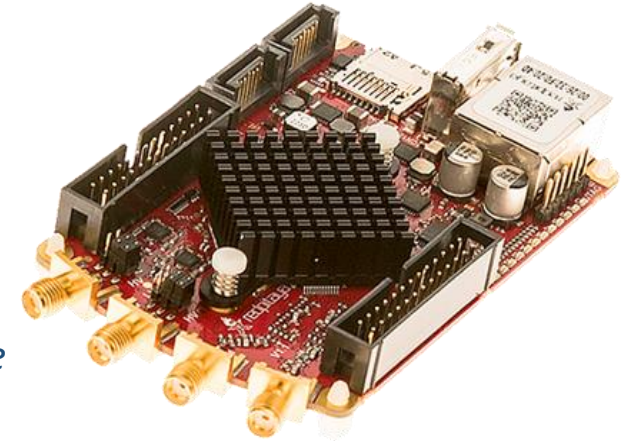
- ☐ Scope + rapide, compact, moins cher ...
- ☐ Comptage et TOF ...
- ☐ EPICS embarqué



- Dual core ARM + **FPGA** Xilinx
- OS : **Linux** Ubuntu
- **Dual channel Scope** _ 125 MS/s _ ADC 14bits
- **WEB server** : Scope & générateur de fonctions



- Scope adapté à nos signaux (124 MSample/s)
 - Besoin pour mesure **Bunch** intense sur CF
- Compact avec connectique coaxiale “propre” (SMA)
- Serveur  embarqué déjà disponible (*) et modifiable
- Pas trop cher et rapidement utilisable
- FPGA + Benoit → Nouvelles fonctionnalités possible :
 - **COMPTAGE**
 - **Histogramme TOF**



Diagnostic faisceau + Redpitaya

= Instrument autonome complet directement connecté au Réseau et accessible par Client EPICS

Fonction : SCOPE + Contrôle Amplificateur

EPICS

OPI

Ethernet Network
(Channel Access Protocol)

Mesure de l'intensité d'un paquet d'ions sur Coupelle de Faraday (CF)

Buncher Gate

courant (nA)

Paquet d'ions de 30 keV

trigger

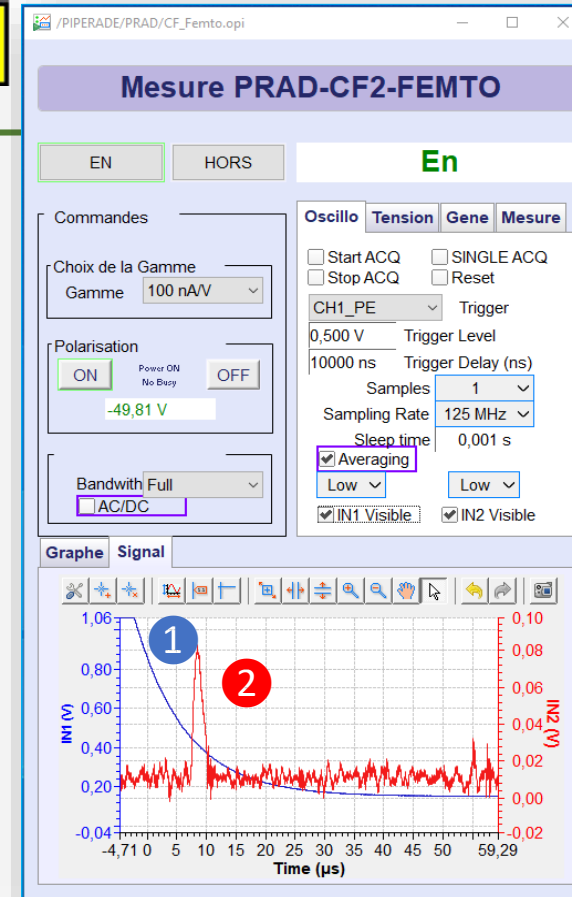
1

2

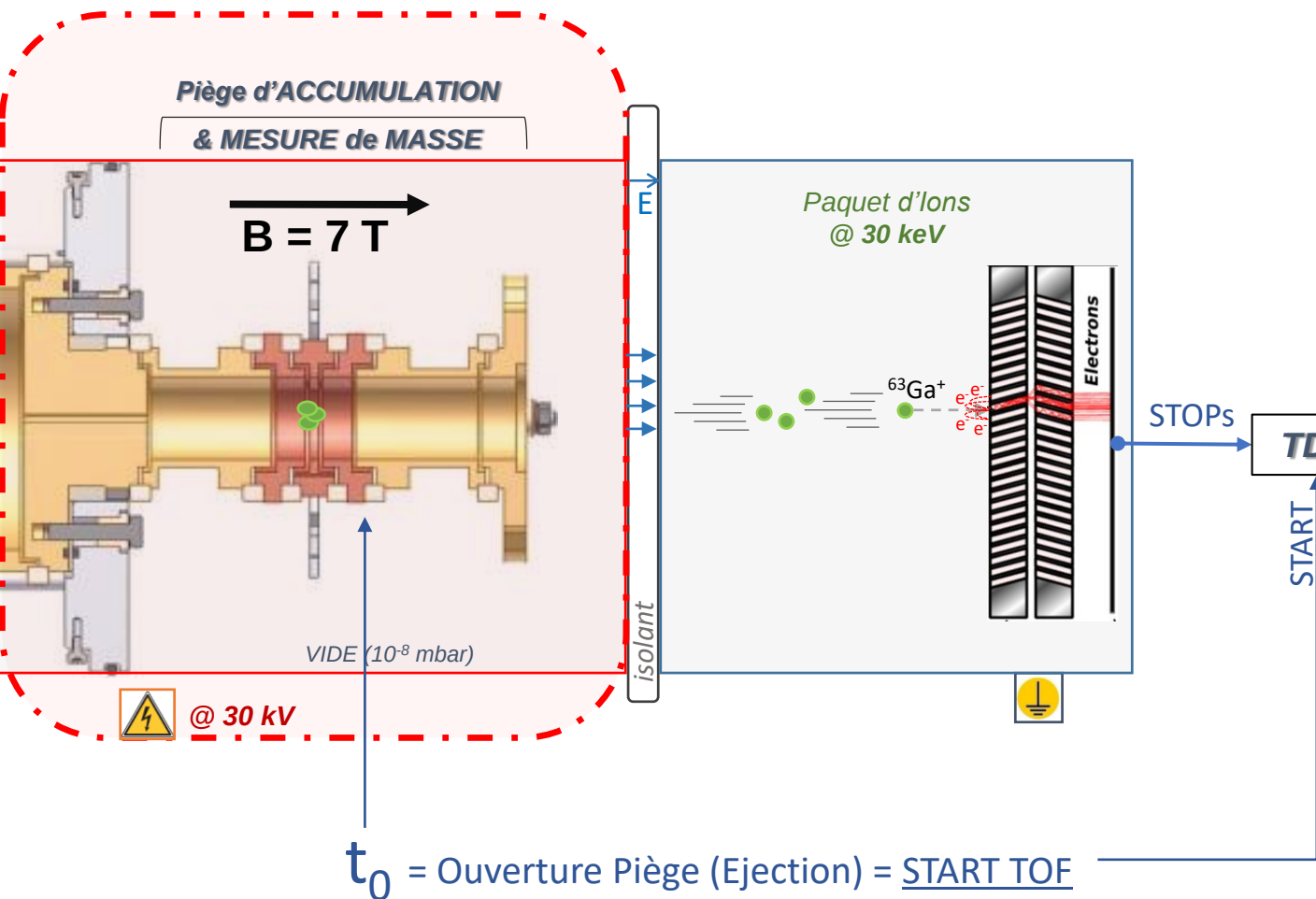
tension

Gamme
Etats
Filtre

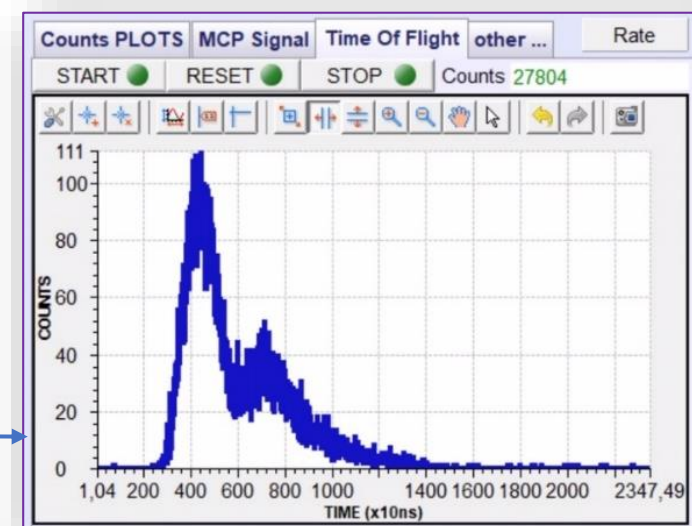
Amplificateur de
transimpédance I/V
FEMTO model DHPCA



- Installation base EPICS (3.15)
- Pilote EPICS (Australian synchrotron)
- Base de données EPICS



Histogramme TOF



EPICS



redpiTOF



Développement Service Intru. & Det.
Benoit Lachacinski

Publ. Proceedings ICALEPCS_2021 – Shangai (CN) - Oct 2021 coming soon ...

SCOPE + « New FPGA IP » : Comptage + Temps de Vol + Histogramme

EPICS

OPI

Comptage d'ions et TOF sur MCP

Buncher Gate

Signal
MCP

2 Discriminateur

[START]

Counts
[STOP]

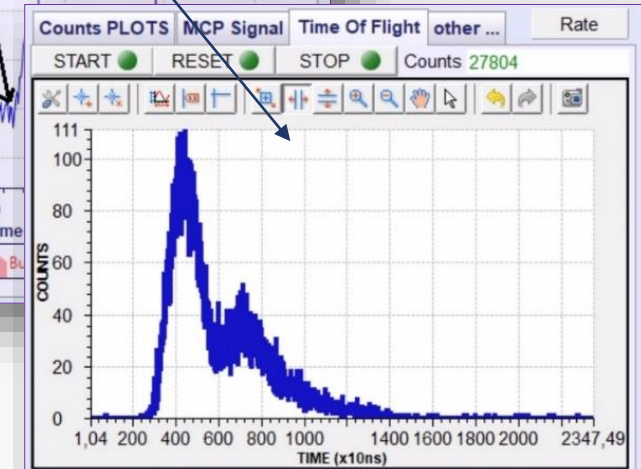
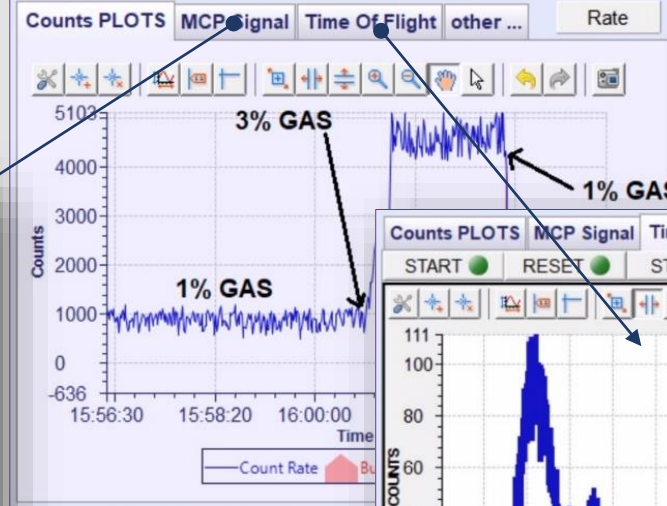
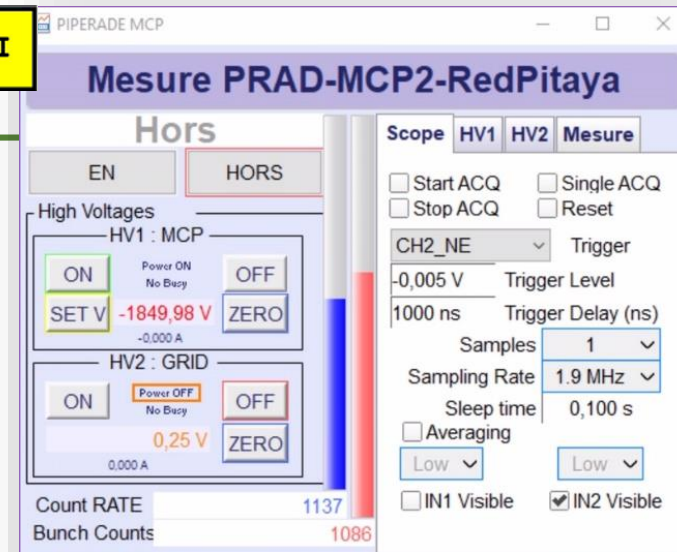
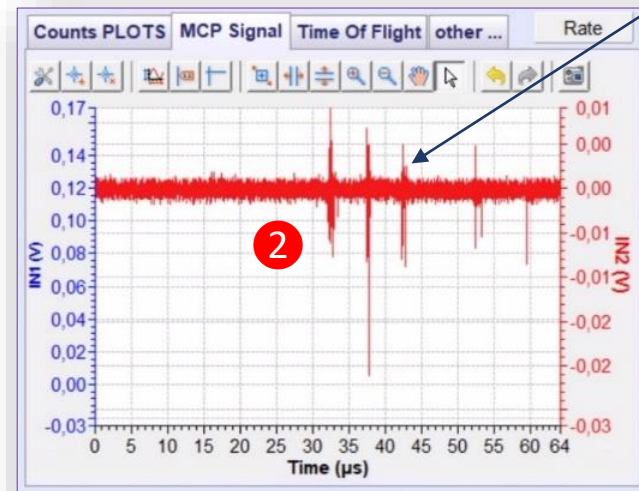
A 50 MHz COUNTER
with on-line
TOF HISTOGRAM

IOC



CNRS
redpitTOF

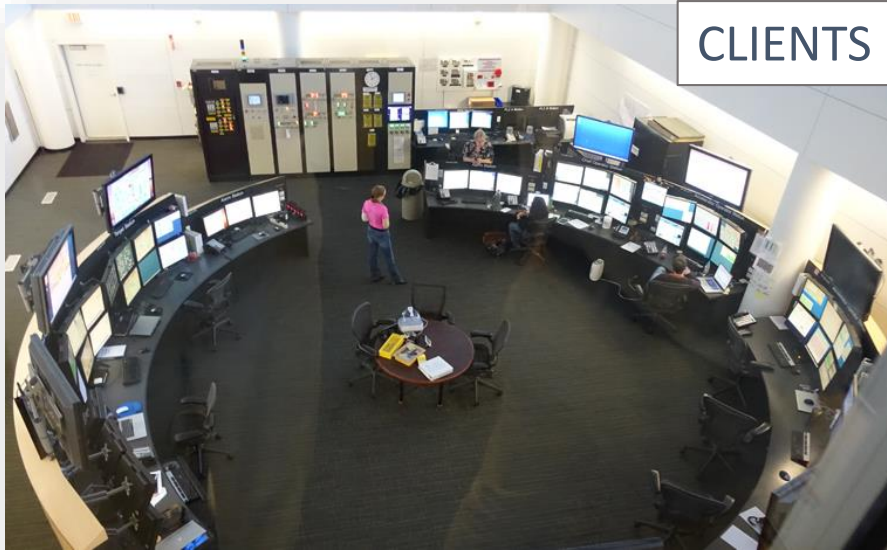
Paquet
d'ions de
30 keV



Ethernet Network
(Channel Access Protocol)

Qu'est-ce qu'EPICS ?

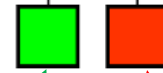
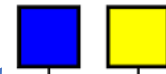
Une architecture « Client-Serveur » de Contrôle-commande mais pas que ...



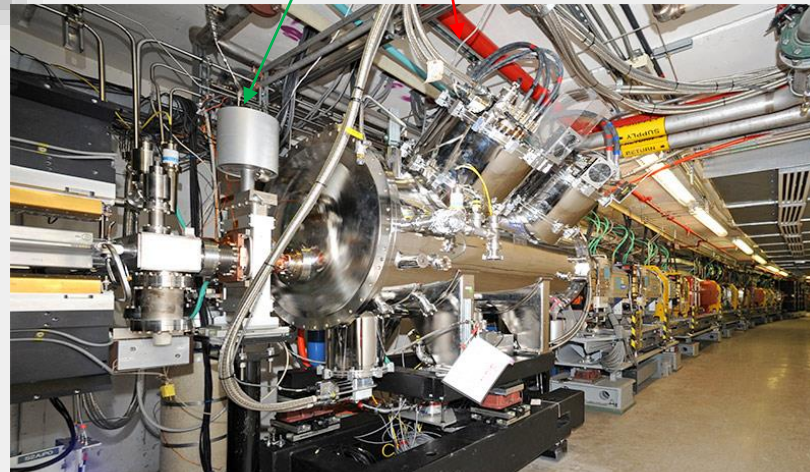
CLIENTS

Réseau Ethernet

EPICS



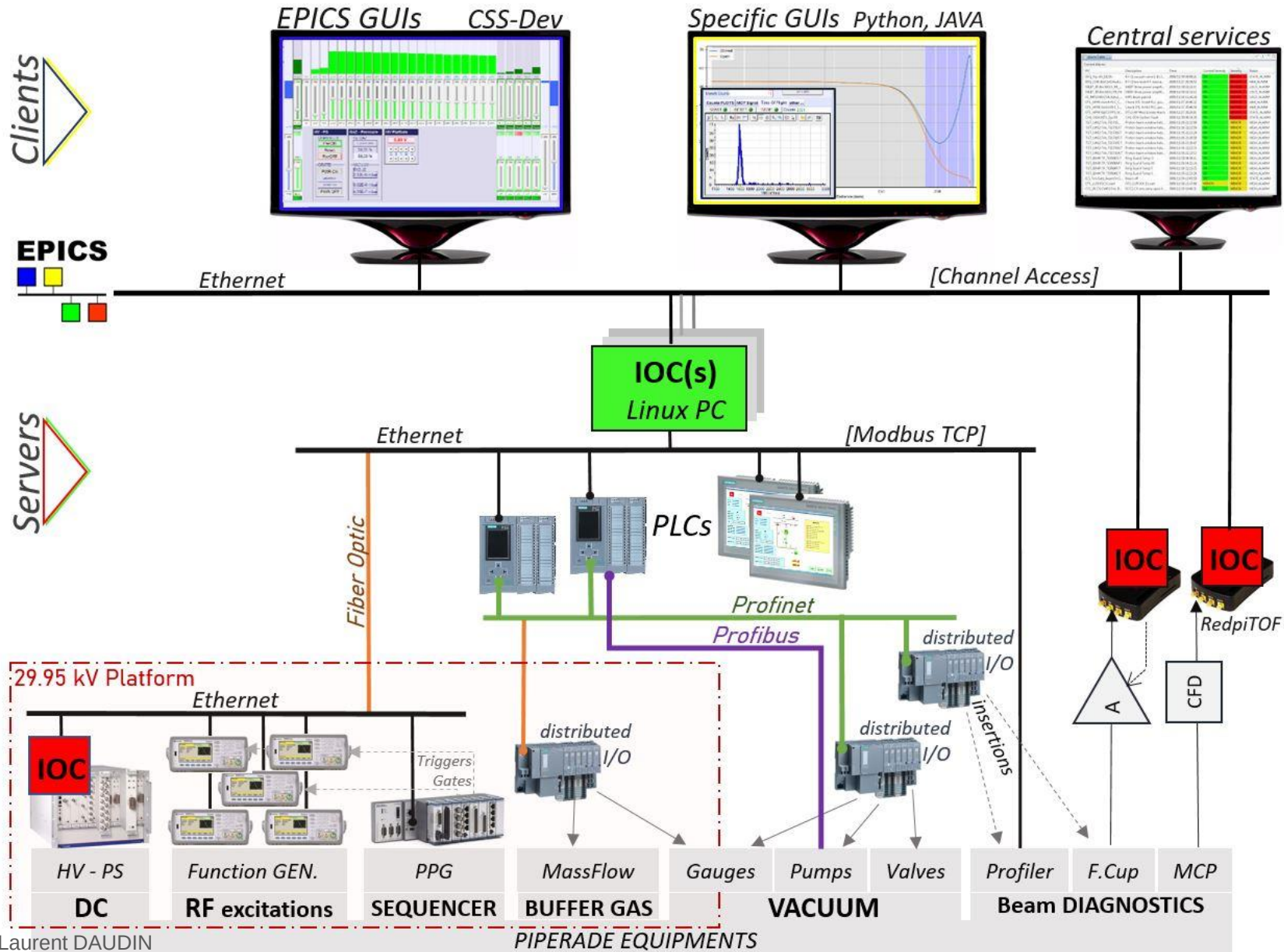
SERVEURS



de l'ACCELERATEUR ... aux EXPERIENCES

fera l'objet d'un Séminaire l'an prochain ...

Architecture CC PIPERADE



Merci de votre attention !



Groupe noyaux exotiques :

P. Ascher – B. Blank – A. De Roubin – M. Flayol – M. Gerbaux – S. Grevy – M. Hukkanen - A. Husson

Service instrumentation et détecteurs :

P. Alfaut – L. Daudin – B. Lachacinski – (B. Thomas)

Service mécanique :

(S. El Abbeir) - (F. Delalée) - S. Perard - M. Roche : *bureau d'études*
F. Mesples - F. Munoz - (J. Outrequin) : *Atelier*



Le 1er janvier 2022
le CENBG
devient



Laurent DAUDIN



ANR



université
de BORDEAUX

Echanges Techniques CENBG - PIPERADE

CENBG - 16 Déc. 2021

1^{ère} Mesure nécessaire : Comptage d'ions

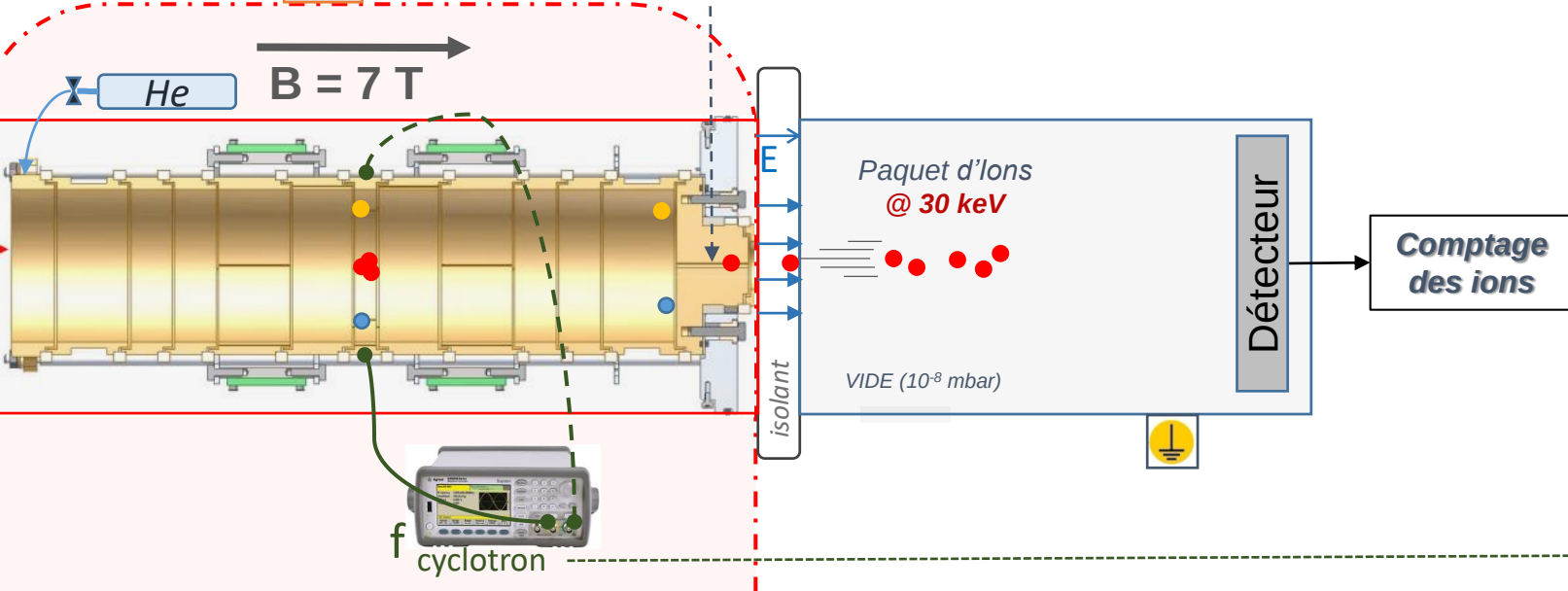
● Noyau d'intérêt

● Contaminants



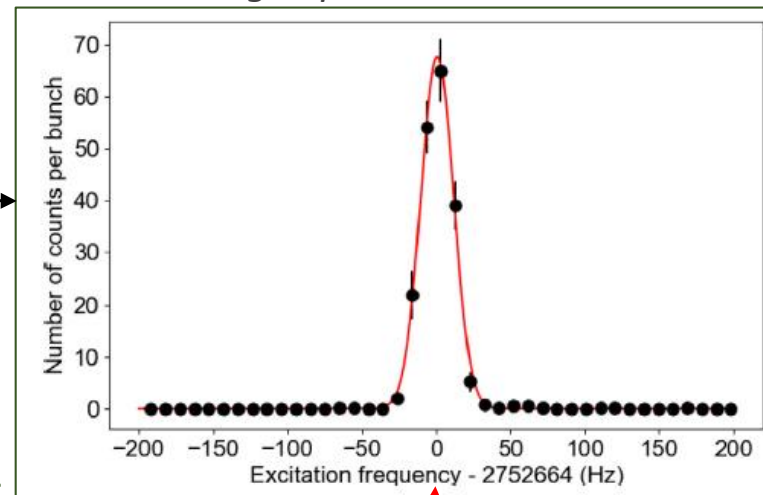
@ 30 kV

diaphragme

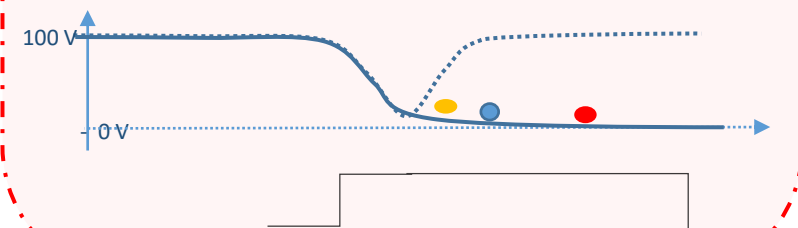
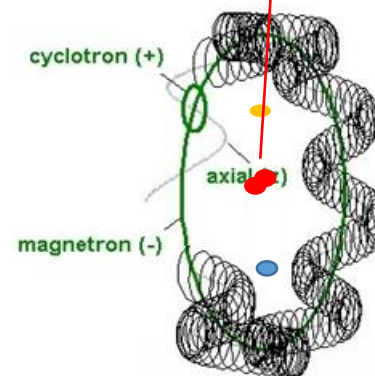


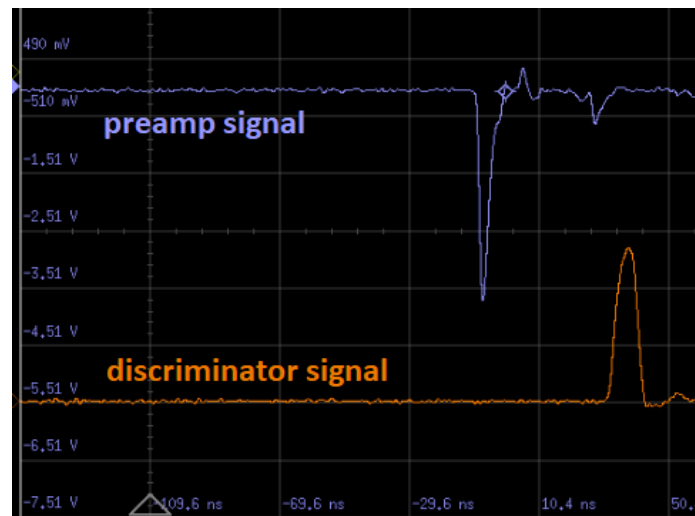
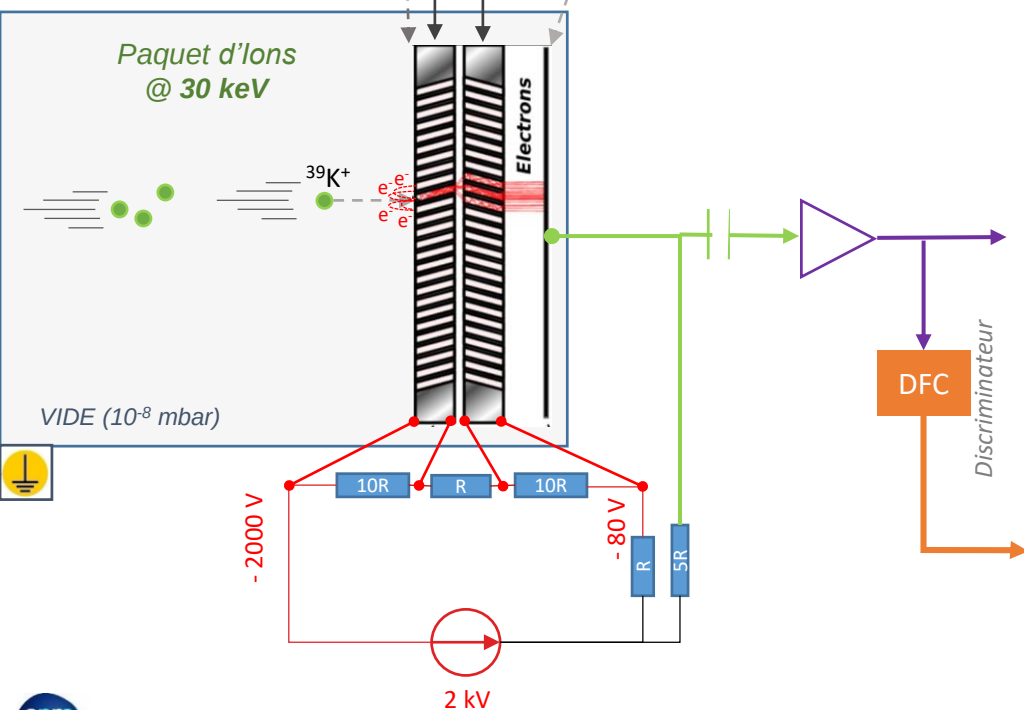
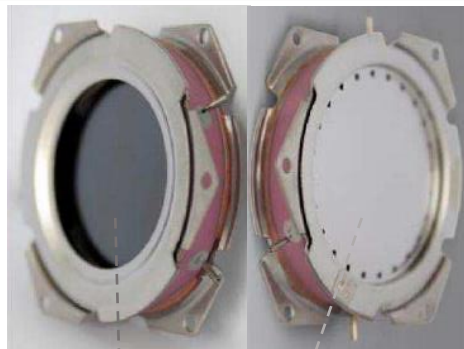
Exemple 2 : Réglage excitation Cyclotron

→ Recentrage optimal des ions d'intérêt



$f_{\text{cyclotron}}$





Reprinted from Nuclear Instruments and Methods, Vol. 162, 1979, pages 587 to 601

MICROCHANNEL PLATE DETECTORS

JOSEPH LADISLAS WIZA

plates, used singly or in a cascade, allow electron multiplication factors of 10^4 - 10^7 coupled with ultra-high time resolution (< 100 ps) and spatial resolution limited only by the channel dimensions and spacings; $12 \mu\text{m}$ diameter channels with $15 \mu\text{m}$ center-to-center spacings are

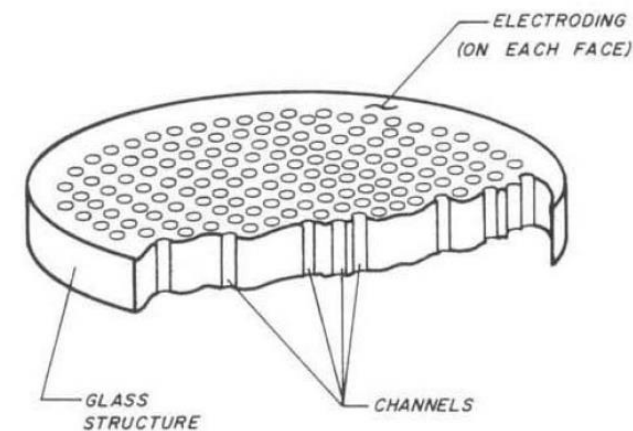
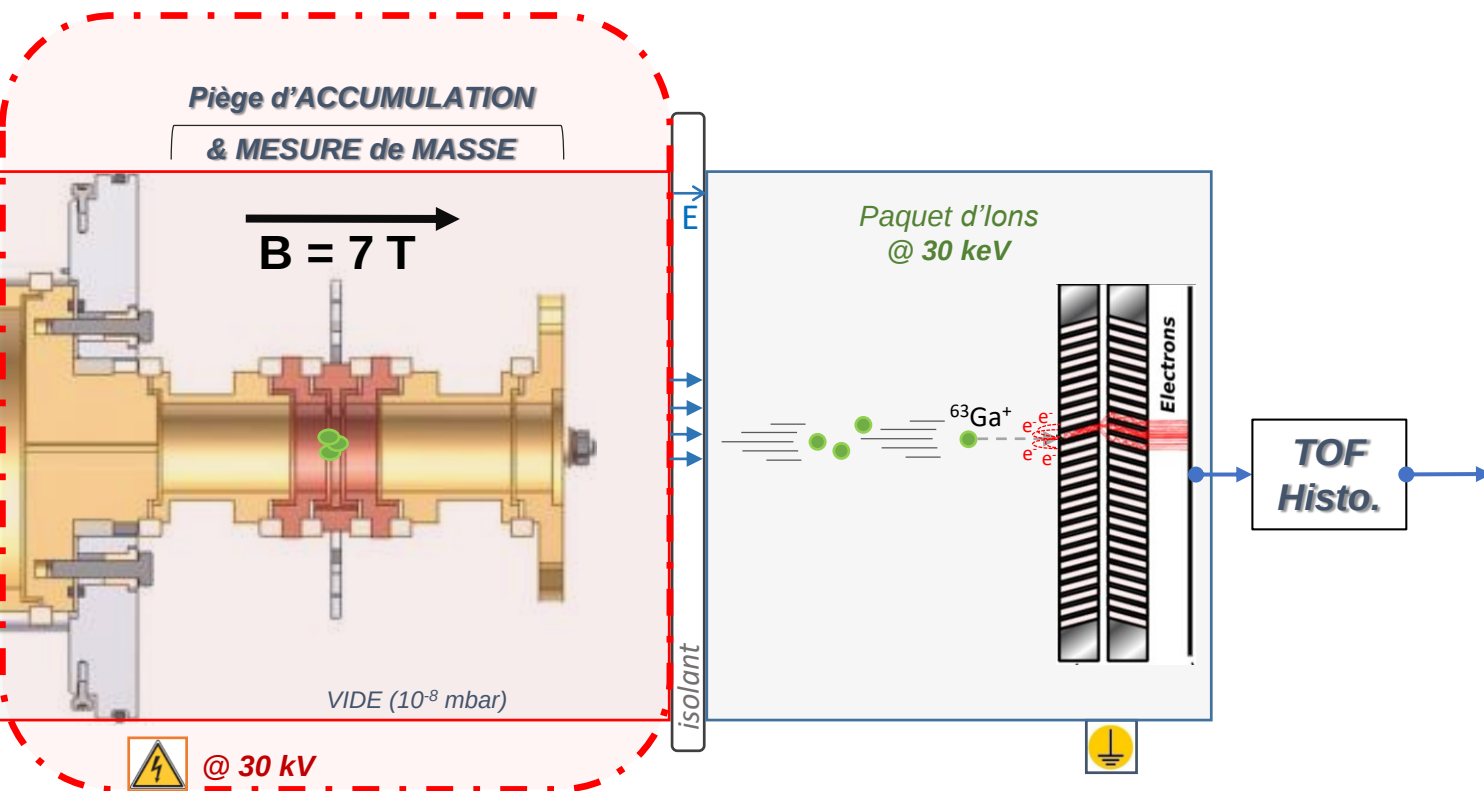
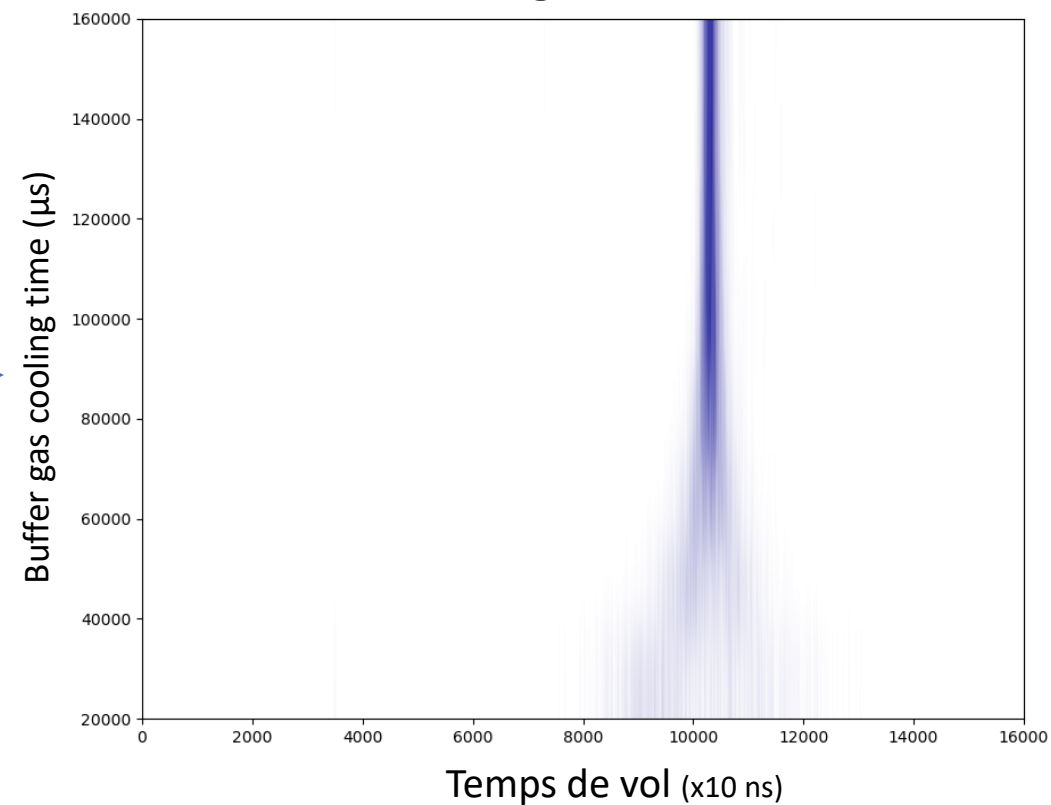
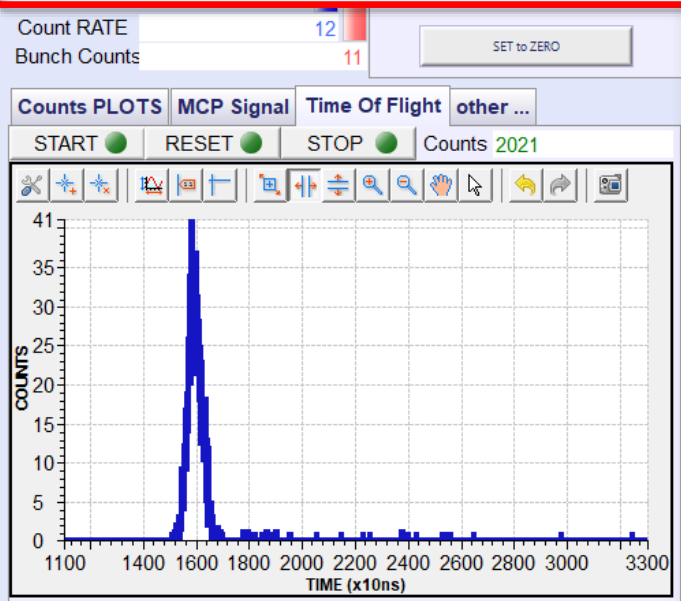


Fig. 1. A microchannel plate, (cutaway view)

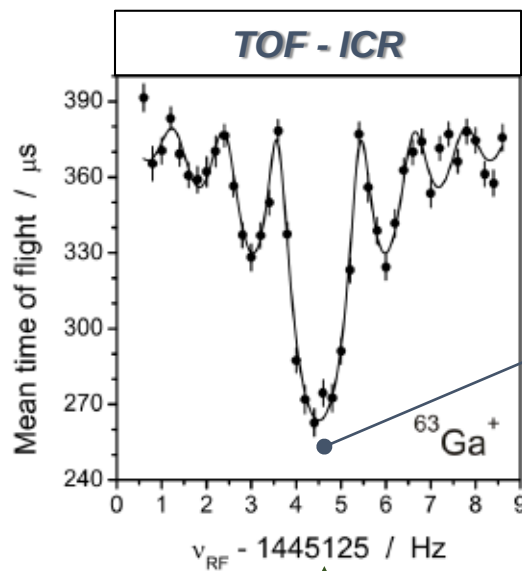


Scan « Cooling time » (14 nov. 2021)

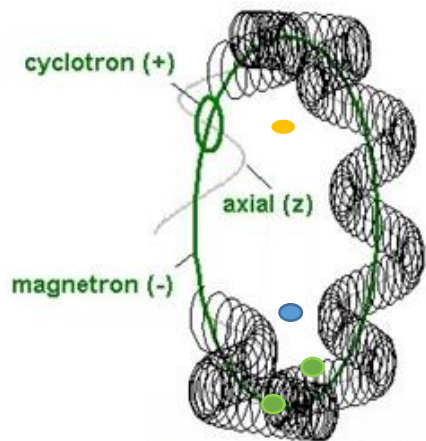




Time-Of-Flight Ion Cyclotron Resonance



Champ magnétique mesuré
précisément avant et après la mesure
par la même technique
avec un ion stable de masse connue.



$f_{\text{cyclotron}}$

$$\vartheta_c = \frac{q \cdot B}{2\pi \cdot m}$$

Scan fin (pas de 0,2 Hz) de la
fréquence d'excitation Cyclotron

**Masse du noyau
mesurée avec précision**