

# Présentation des accélérateurs du GANIL et des diagnostics associés

Christophe JAMET (GANIL)

- ✓ Le GANIL
- ✓ Installation SPIRAL2
- ✓ Structures et caractéristiques du faisceau
- ✓ Electroniques de mesures
- ✓ Mesures d'intensité
- ✓ Profileurs
- ✓ Mesures de longueur de paquets
- ✓ Mesures de vitesse et d'énergie
- ✓ Beam Position Monitors
- ✓ Intégration de diagnostics

Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) est situé à CAEN en Normandie

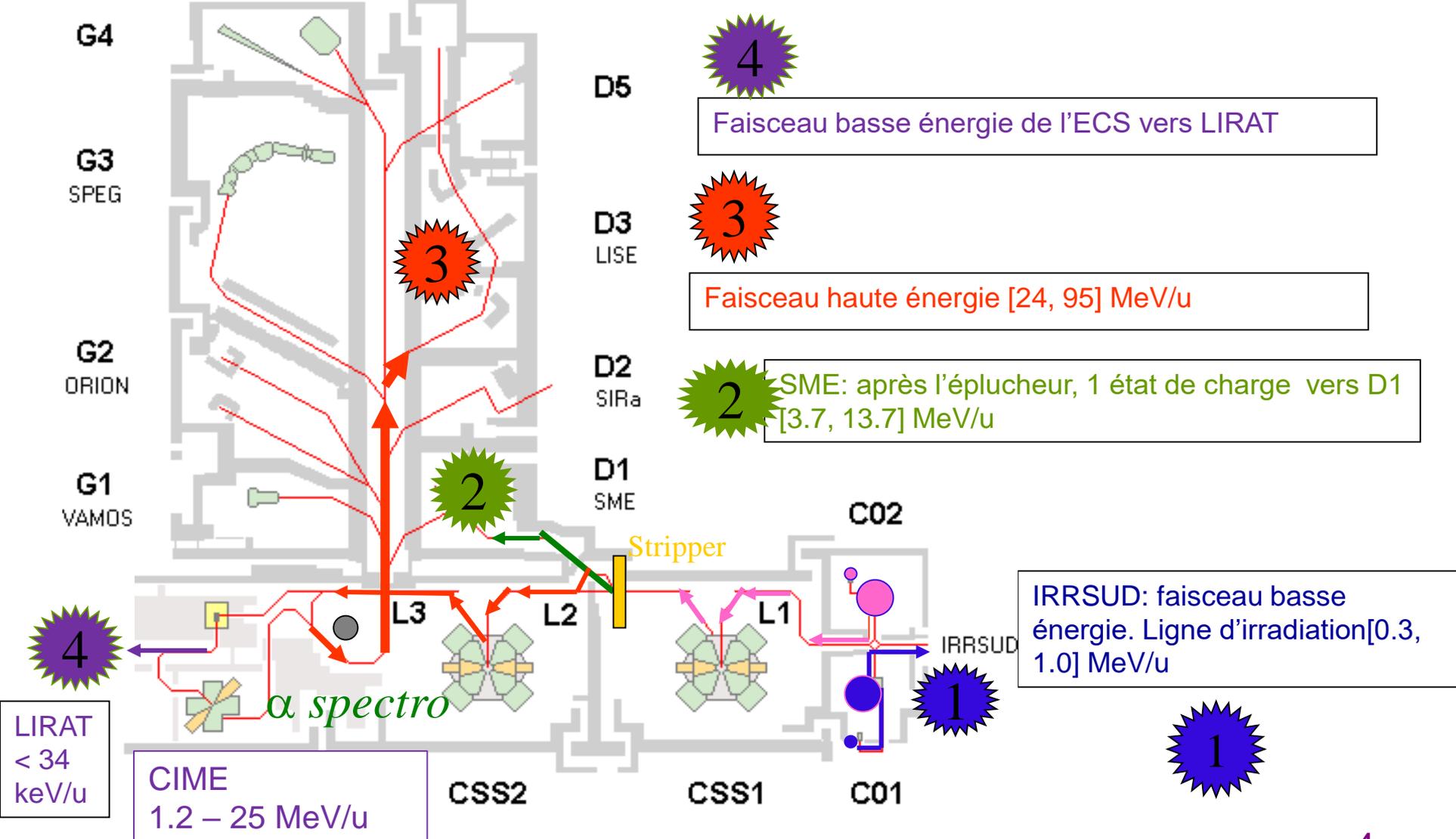
## Historique

- ✓ 1973 : Début projet
- ✓ 1975 : Décision de réalisation
- ✓ 1983 : Premier faisceau délivré à la physique
- ✓ 2001 : Premier faisceau SPIRAL1

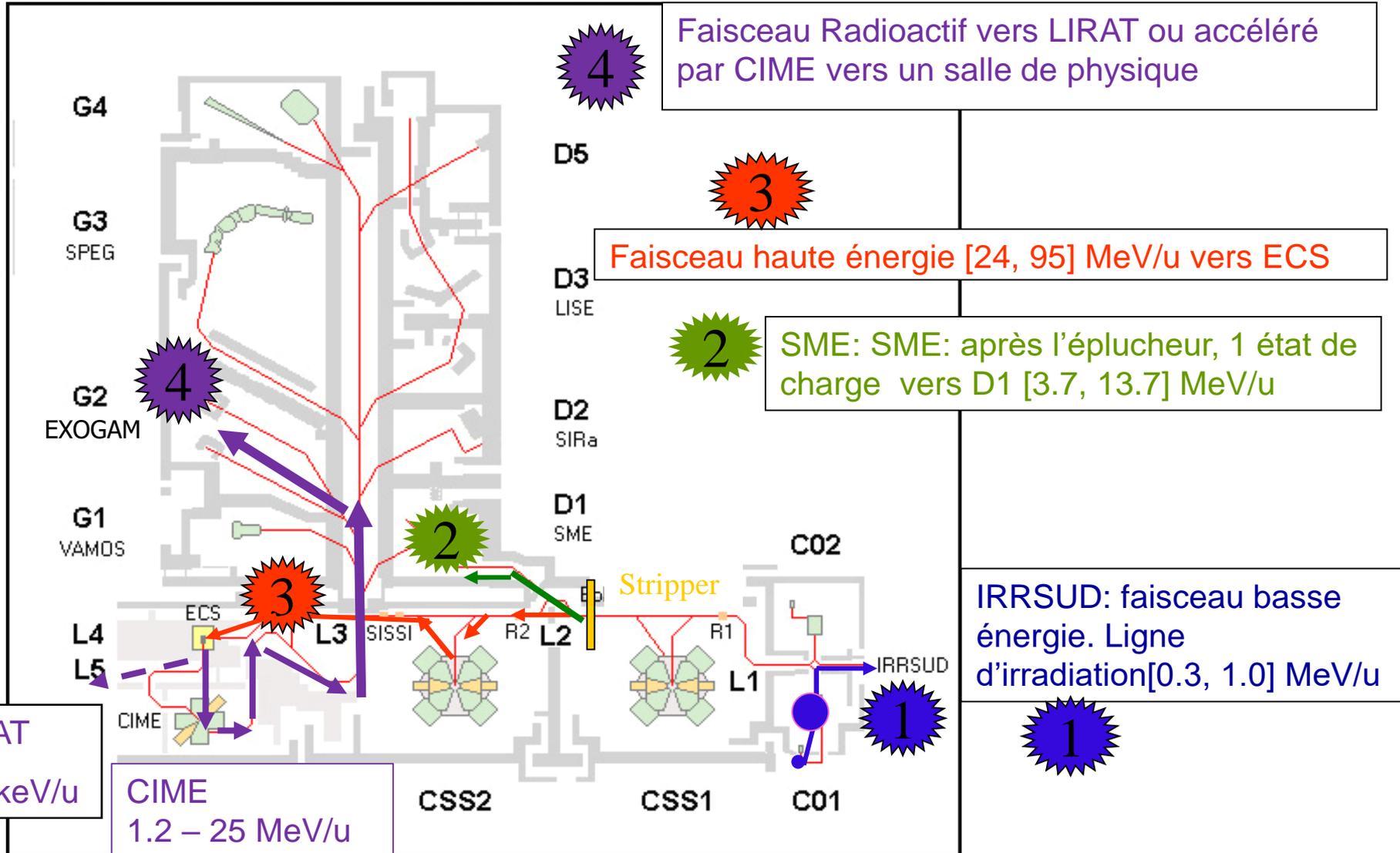


L'installation d'origine utilise des cyclotrons pour accélérer les faisceaux d'ions.

Fonctionnement Multifaisceaux : 4 faisceaux stables en parallèle



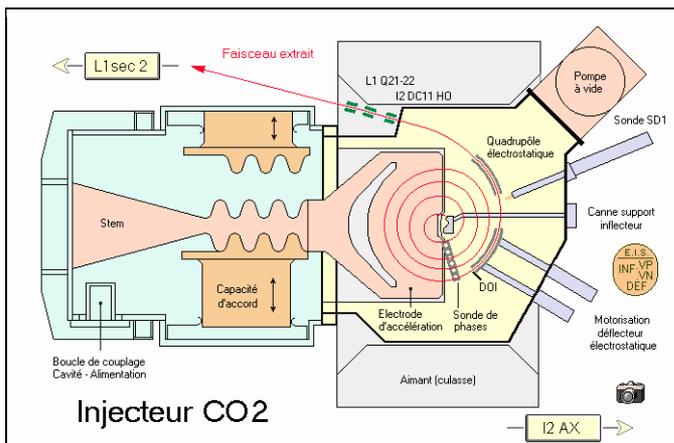
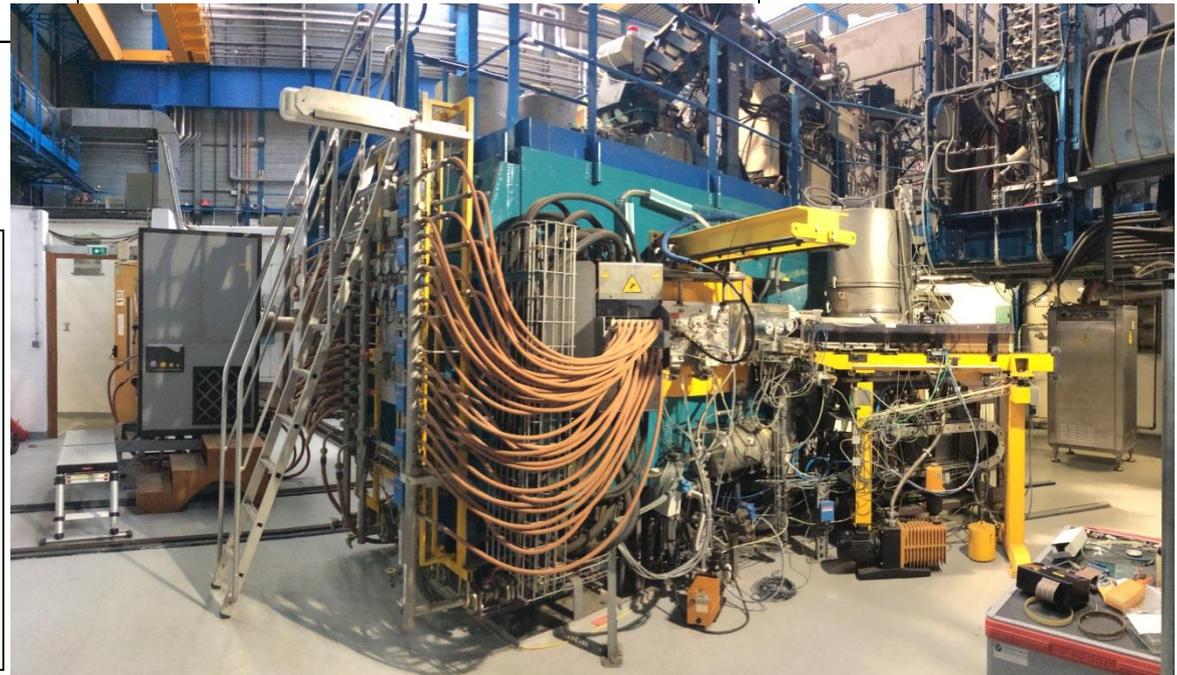
## Fonctionnement avec un faisceau radioactif venant de SPIRAL1.



## Cyclotrons C01 et C02

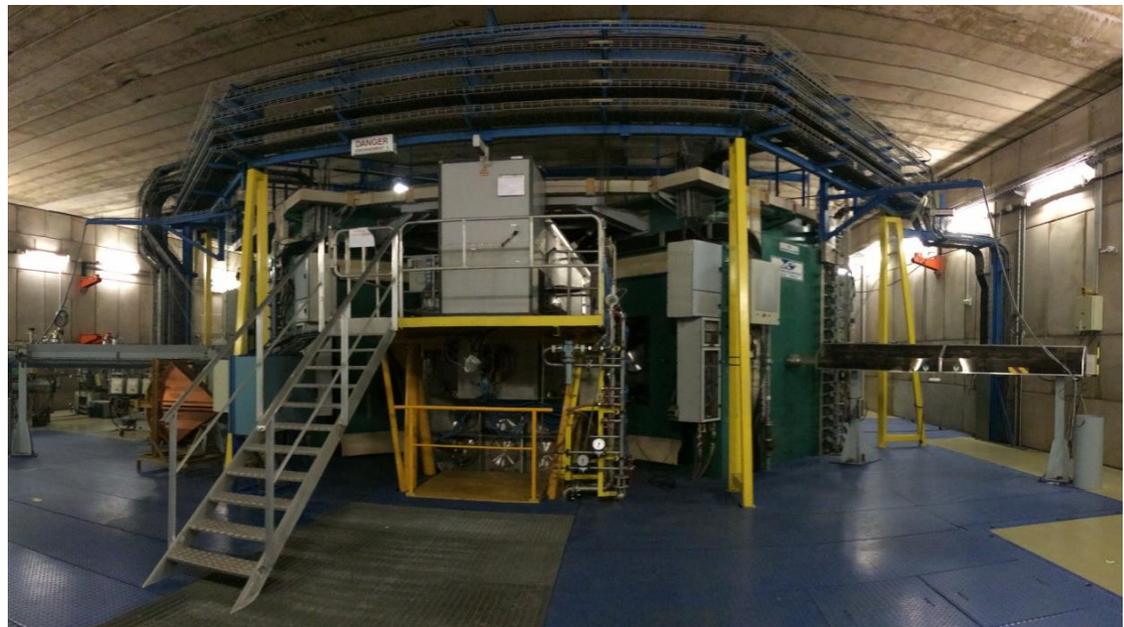
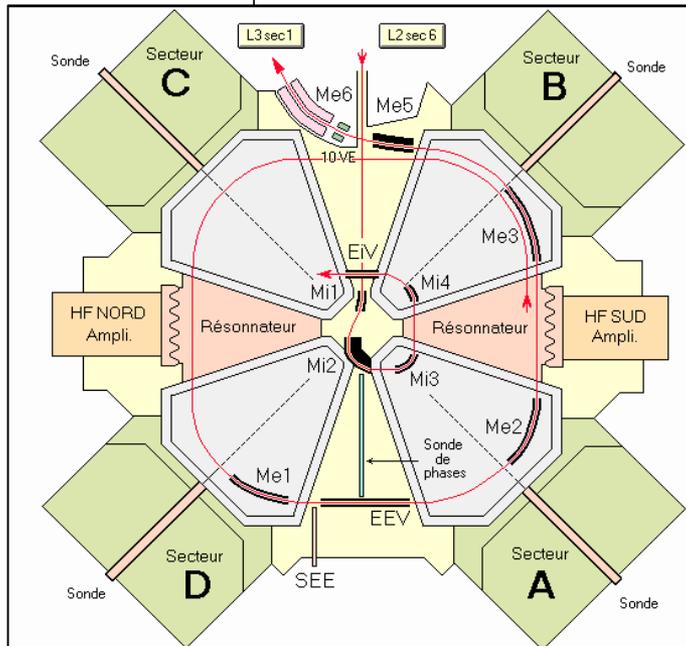
**Chaîne d'accélération :** ions produits par une source ECR injectés dans un cyclotron compact (K=30) puis 2 cyclotrons à secteurs séparés (K=380) en cascade séparés par un éplucheur.

AIMANTS	CAVITES ACCELERATRICES
Induction maximale : 1,6 Tesla (16000 Gauss)	Gamme de fréquence : 7 à 14 MHz
Circuit magnétique (culasse) d'un secteur : Masse : 400 tonnes Hauteur : 3 m Longueur : 2 m	Tension maximale : 90 kV Puissance dissipée maximale : 30 kW
Bobines principales (2 par secteur) Intensité maximale : 1000 A Masse de cuivre : 3,4 tonnes	



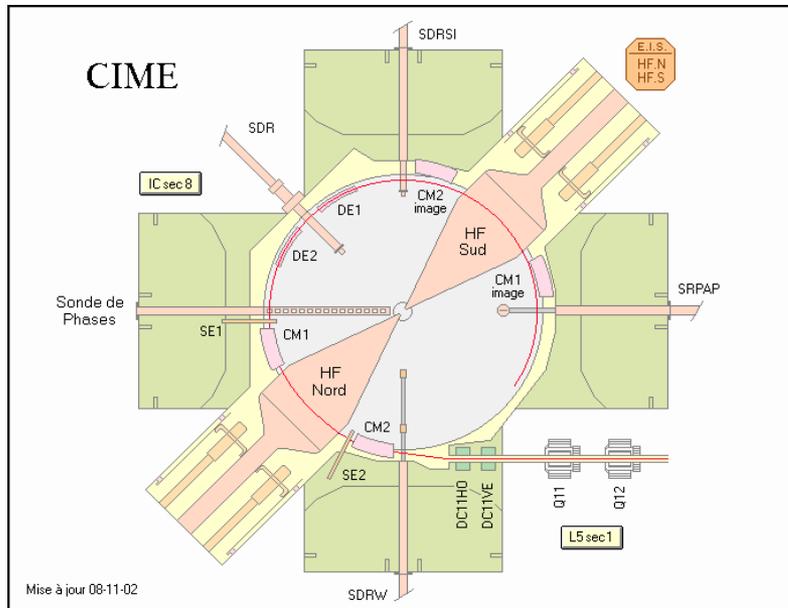
## Cyclotrons CSS1 et CSS2

AIMANTS CSS	CAVITES ACCELERATRICES
Induction maximale : 1,6 Tesla (16000 Gauss)	Gamme de fréquence : 7 à 14 MHz
Circuit magnétique (culasse) d'un secteur : Masse : 430 tonnes Hauteur : 4,82 m Longueur : 5,11 m	Tension maximale : 250 kV Puissance dissipée maximale : 100 kW
	CHAMBRE A VIDE
	Pression interne : $6 \cdot 10^{-6}$ Pascal (4,510 <sup>-8</sup> mb)
	Diamètre : 9,6 m
	Volume : 46 m <sup>3</sup>
	Poids : 57 tonnes
	Surfaces exposées au vide : 1000 m <sup>2</sup> d'acier inoxydable 600 m <sup>2</sup> de fer 600 m <sup>2</sup> de cuivre



## Cyclotron CIME sur l'installation SPIRAL1

AIMANTS CIME	CAVITES ACCELERATRICES
Induction maximale : 1,6 Tesla (16000 Gauss)	Gamme de fréquence : 9,6 à 14,4 MHz
Circuit magnétique (culasse) : Masse : 550 tonnes Hauteur : 3,2 m Diamètre : 6,4 m	Tension maximale : 100 kV Puissance dissipée maximale : 80 kW
Bobines principales Intensité maximale : 900 A Masse de cuivre : 4,5 tonnes	CHAMBRE A VIDE
	Pression interne : $4 \cdot 10^{-6}$ Pascal ( $4 \cdot 10^{-8}$ mb)
	Diamètre : 4 m
	Volume : $7 \text{ m}^3$
	Poids : xx tonnes
	Surfaces exposées au vide : 81m <sup>2</sup> d'acier inoxydable 38,5 m <sup>2</sup> de fer 42 m <sup>2</sup> de cuivre



# Installation SPIRAL2

## Système de Production d'Ions RAdioactifs en Ligne de 2e génération

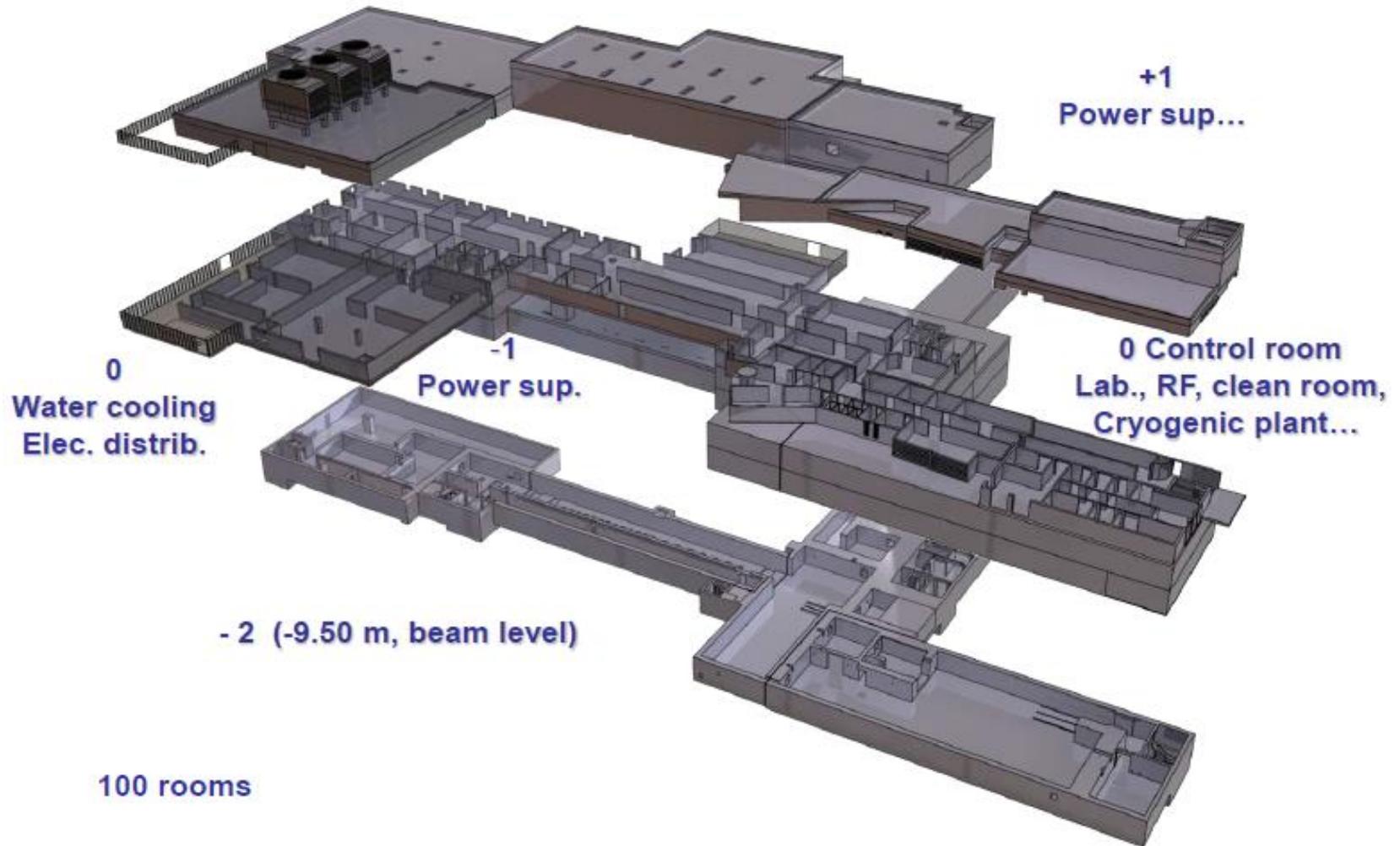
### Historique

- ✓ 2006: Début projet
- ✓ 2010: Construction du bâtiment
- ✓ 2015: Faisceau à la sortie du RFQ
- ✓ 2018: Démontage du BTI, montage de la LME



# Installation SPIRAL2

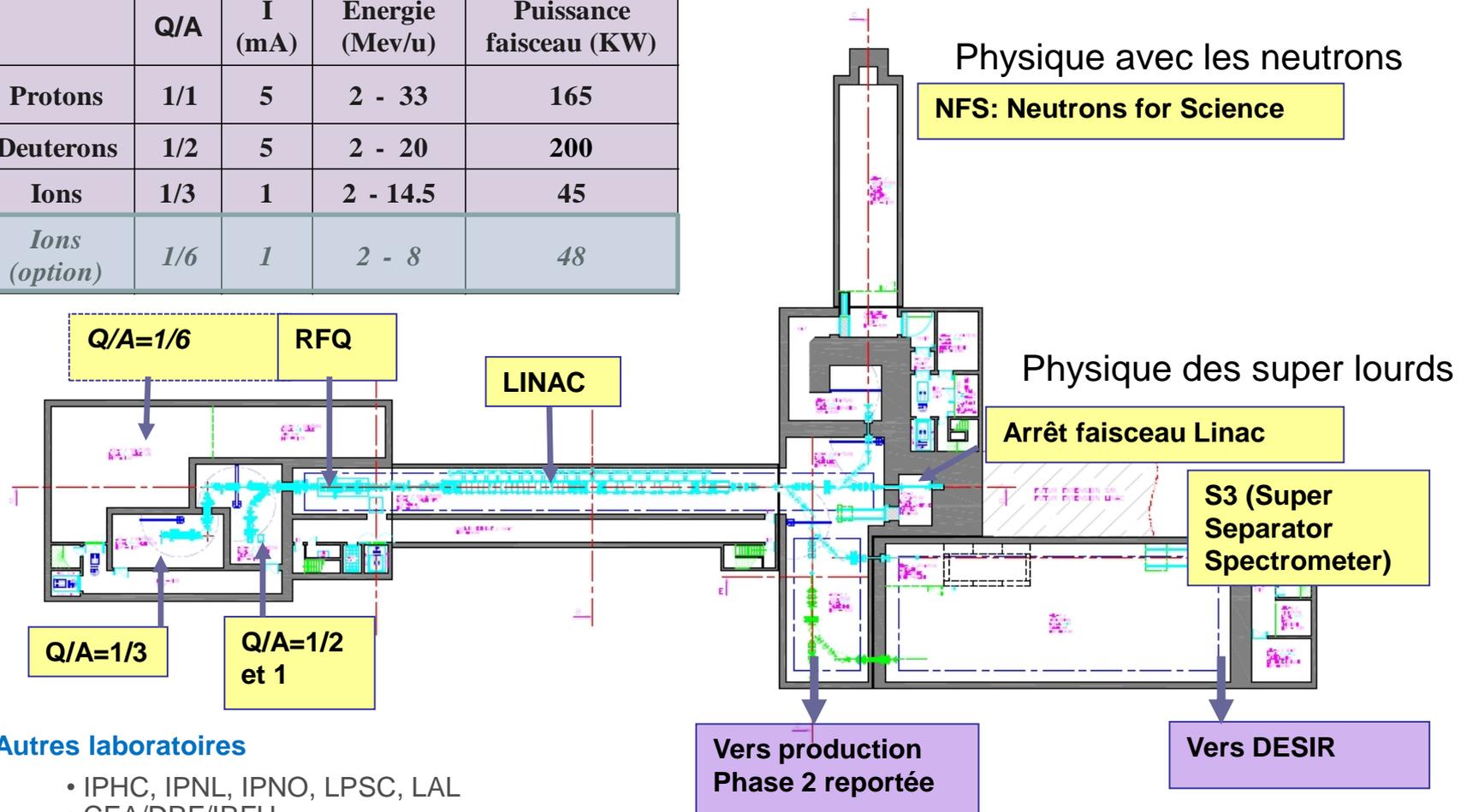
## Bâtiment



# Installation SPIRAL2

SPIRAL2 utilise un RFQ et un linac avec des cavités accélératrices supra pour atteindre des intensités jusqu'à 1000 fois supérieures à celles du GANIL existant.

	Q/A	I (mA)	Energie (Mev/u)	Puissance faisceau (KW)
Protons	1/1	5	2 - 33	165
Deuterons	1/2	5	2 - 20	200
Ions	1/3	1	2 - 14.5	45
<i>Ions (option)</i>	<i>1/6</i>	<i>1</i>	<i>2 - 8</i>	<i>48</i>



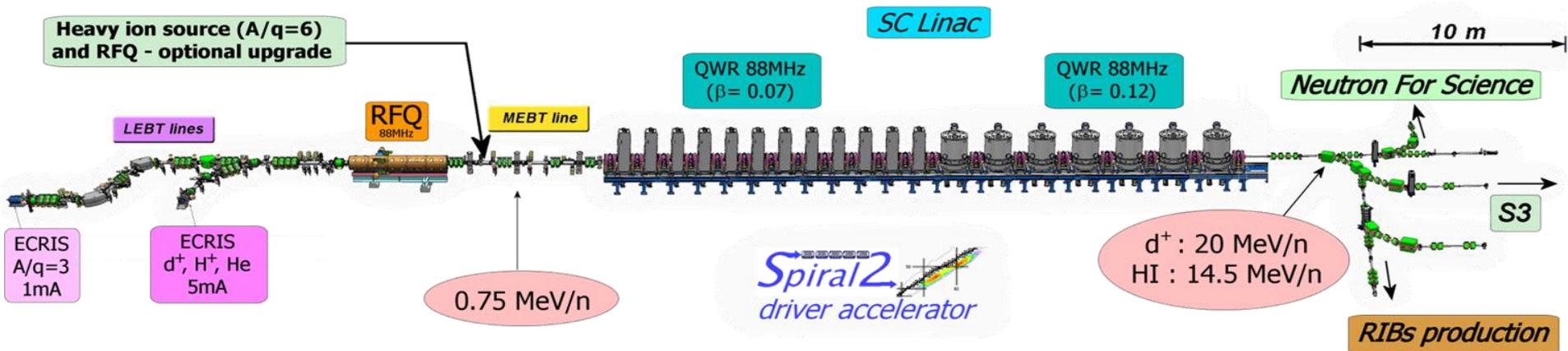
## Autres laboratoires

- IPHC, IPNL, IPNO, LPSC, LAL
- CEA/DRF/IRFU
- INFN Catane
- IFIN Bucarest
- BARC

Desir: Désintégration, excitation et stockage des ions radioactifs

# Installation SPIRAL2

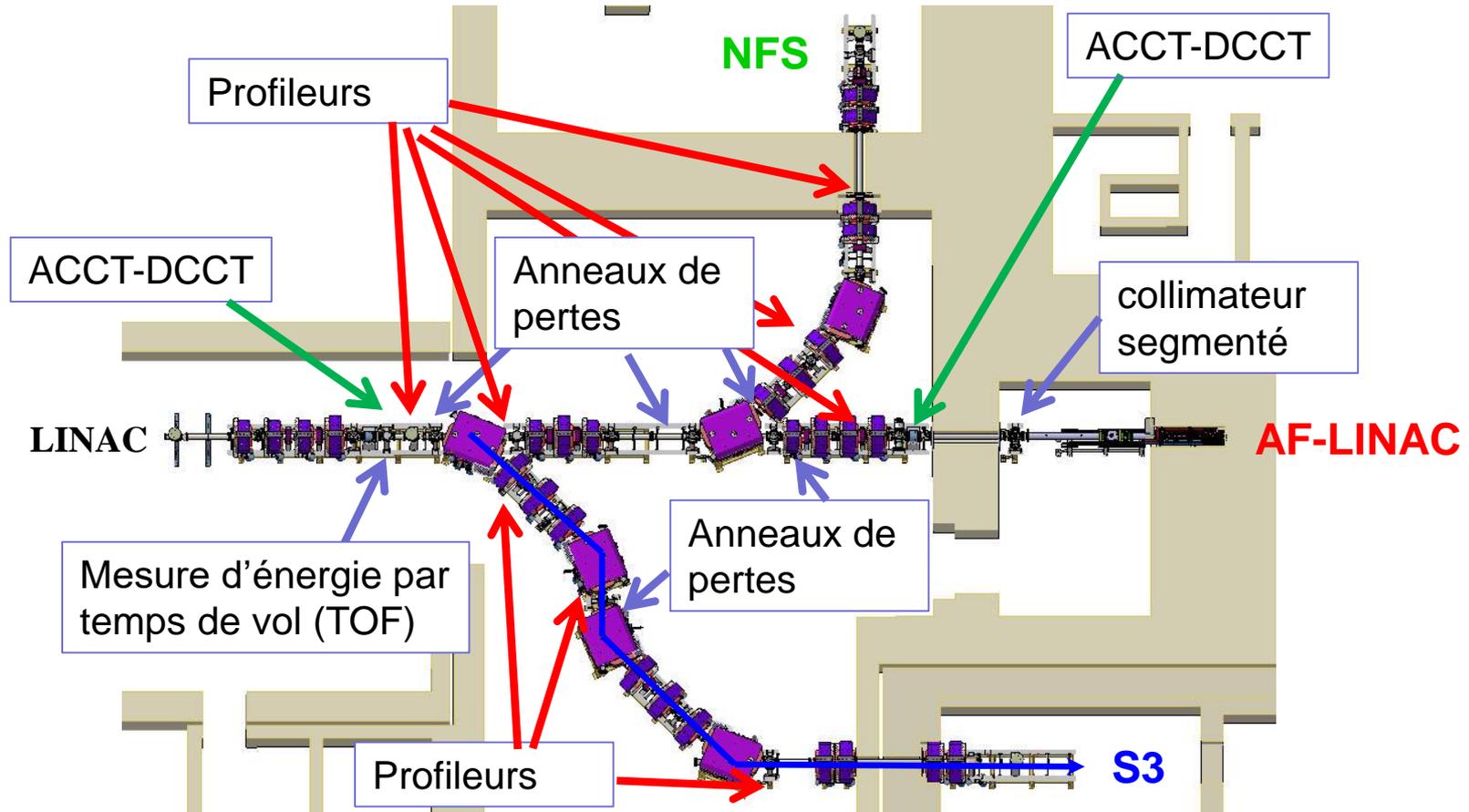
## L'accélérateur SPIRAL2



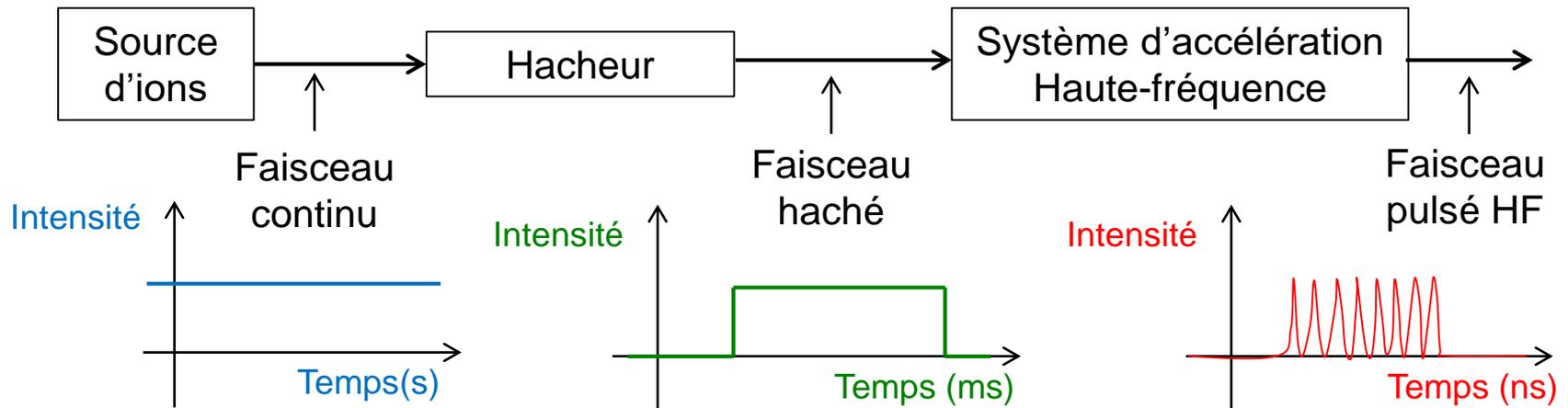


# Installation SPIRAL2

Ligne LHE

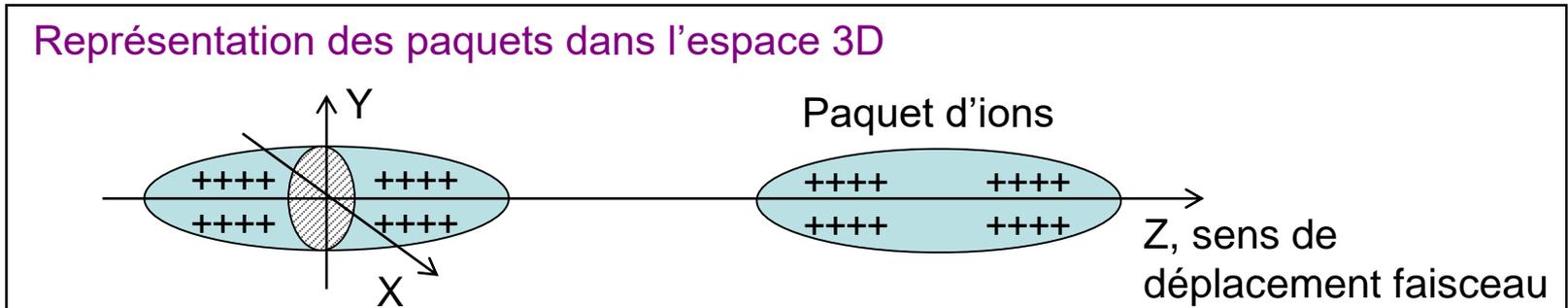


- ✓ La structure temporelle du faisceau évolue le long de l'accélérateur.



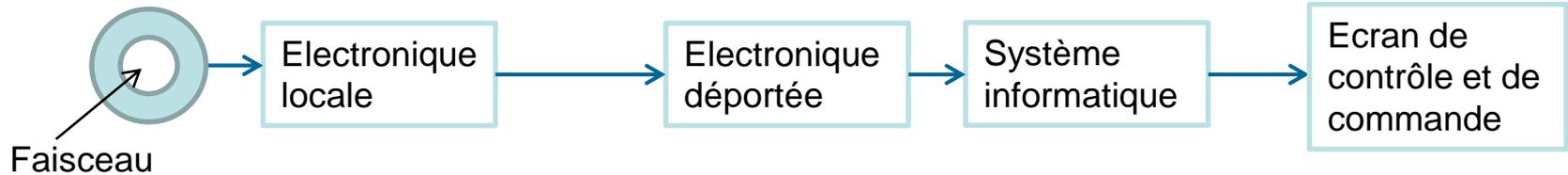
- ✓ Le faisceau est continu à la sortie des sources
- ✓ Il devient « haché » après avoir été dévié périodiquement par le hacheur. (Période: qq 100 $\mu$ s à qq s)
- ✓ Le faisceau accéléré devient pulsé à la fréquence de l'accélérateur à la sortie des systèmes d'accélération, il est composé de paquets d'ions.
  - ✓ Fréquences des cyclotrons du GANIL: 7 à 14 MHz
  - ✓ Fréquences de SPIRAL2 : 88 MHz

- ✓ Le faisceau d'ions accélérés et pulsés se déplace dans l'axe longitudinal (Z) et possède une taille transverse (X horizontal et Y vertical).



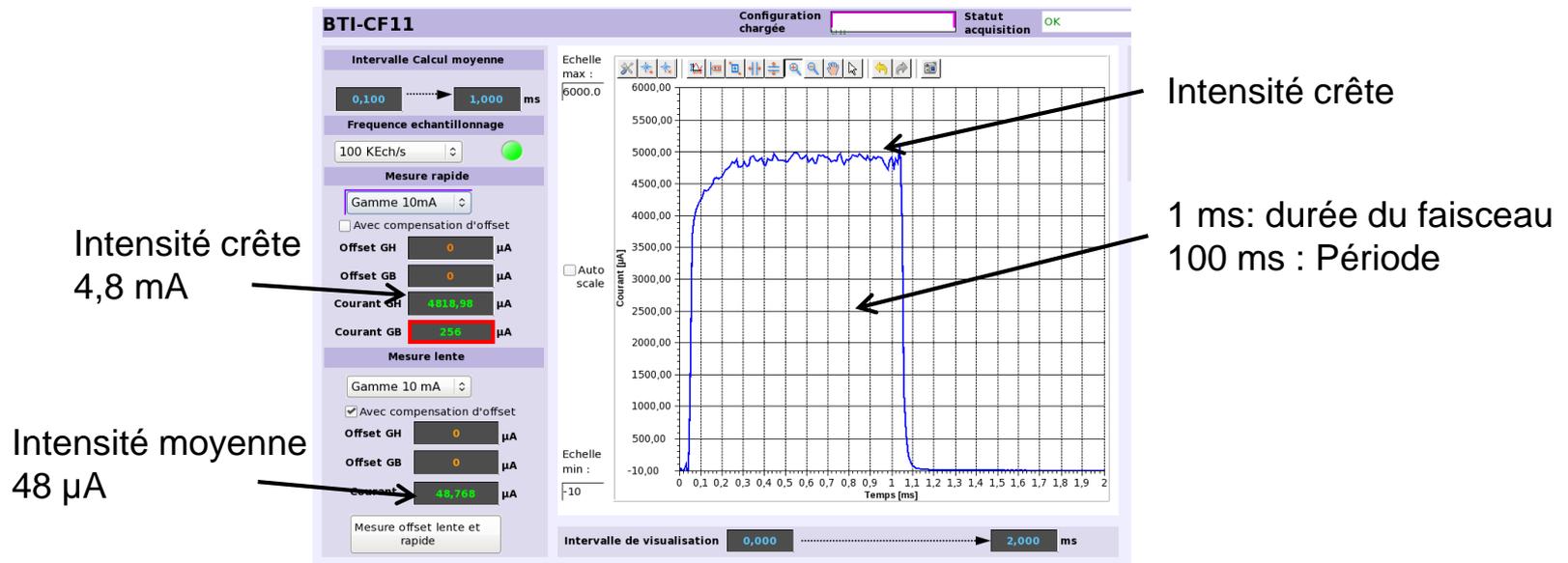
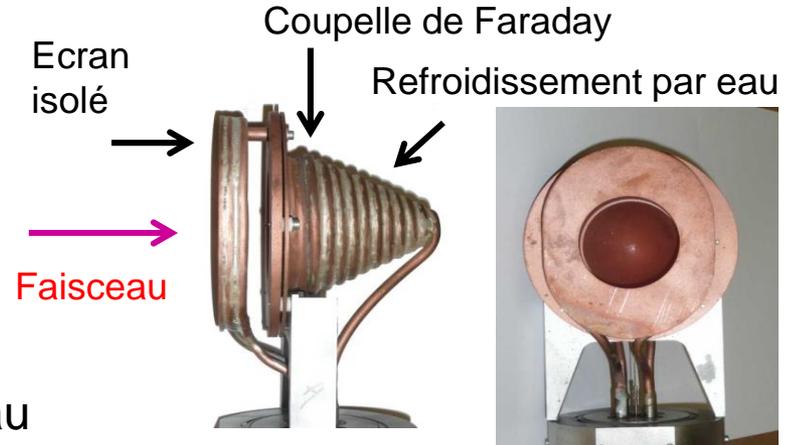
- ✓ Les principales caractéristiques du faisceau à mesurer sont :
  - ✓ L'intensité (nombre de charges électriques qui se déplacent par seconde)
  - ✓ La position sur les axes x, y
  - ✓ La position sur l'axe z (temps, phases)
  - ✓ La taille sur les axes x, y
  - ✓ La taille sur l'axe z (mesures de longueur de paquets)
  - ✓ La vitesse et l'énergie des particules
- ✓ Les diagnostics faisceau peuvent être interceptifs, semi interceptifs ou non interceptifs.

- ✓ Les chaines de mesures diagnostics sont structurées de la façon sui Diagnostic

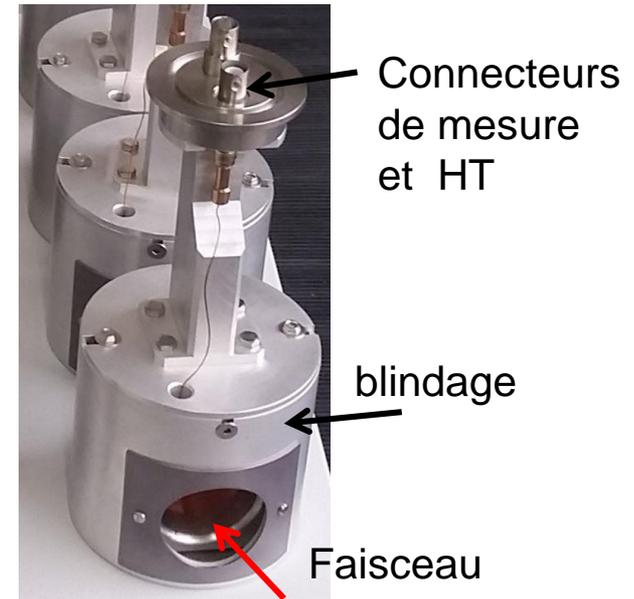


- ✓ L'interaction du faisceau sur un diagnostic produit un signal généralement amplifié par une électronique locale.
- ✓ Le traitement analogique et numérique du signal est effectué dans l'électronique déportée.
- ✓ Les informations sont fournies à un système informatique qui les traite et les visualisent sur un écran de contrôle.
- ✓ La bande passante des électroniques de mesure est fonction du type de faisceau (continu, haché, pulsé) et des caractéristiques à mesurer.

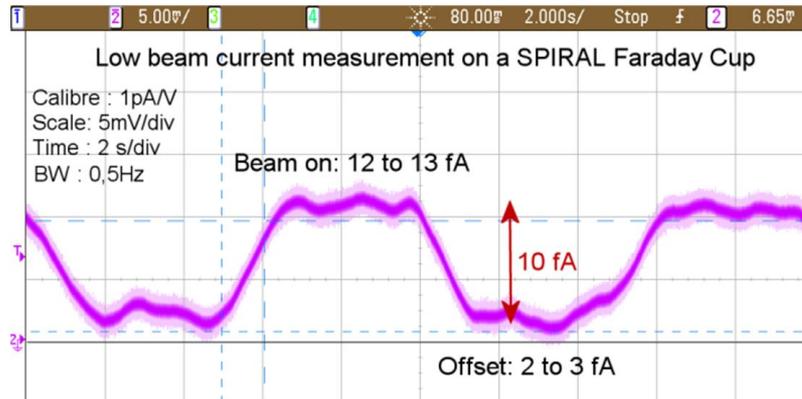
- ✓ Principe: Les coupelles de Faraday (CF) collectent les ions du faisceau de façon interceptive.
- ✓ Exemple1: CF refroidie SPIRAL2
  - ✓ Diamètre: 6 cm
  - ✓ Puissance thermique max: 3 kW
  - ✓ Densité de puissance max: 2600W/cm<sup>2</sup>
  - ✓ Gamme d'intensité: 0,1µA à 10 mA
  - ✓ Bande passante: du continu à qq 10 KHz
- ✓ Ecran de visualisation de l'intensité faisceau



- ✓ Exemple 2: CF non refroidie pour des faisceaux de faibles intensités
  - ✓ Diamètre: 4 cm
  - ✓ Puissance thermique max: qq 10W
  - ✓ Gamme d'intensité: 0,1p A à 10  $\mu$ A
  - ✓ Bande passante: du continu à qq kHz



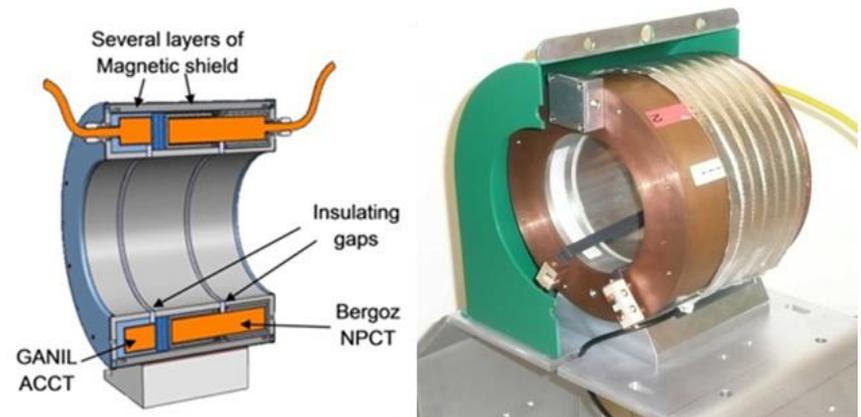
- ✓ Mesure d'une intensité faisceau de 10 fA



Electronique de mesure locale  
PICOLIN



- ✓ Principe: Le champ magnétique autour du faisceau est canalisé dans un tore, des spires autour du tore génèrent les signaux proportionnels à l'intensité faisceau de façon non-interceptive
- ✓ Sur SPIRAL2, deux types de transformateurs sont utilisés.
- ✓ DCCT (DC Current Transformers)
  - ✓ Gamme d'intensité: 50 $\mu$ A à 10 mA
  - ✓ Bande passante: du continu à 10 kHz
- ✓ ACCT (AC Current Transformers)
  - ✓ Gamme d'intensité: 0,1 $\mu$ A à 10 mA
  - ✓ Bande passante: continu à qq 100kHz



Electronique locale:  
préampli ACCT



Electroniques déportées: Mesures et surveillances des intensités et transmissions



- ✓ Principe: Une partie du faisceau d'ions est arrêté sur les fentes. Le courant généré est mesuré et surveillé pour protéger chaque fente de pertes thermiques trop importantes.
- ✓ Chaque fente est refroidie par eau, la puissance maximum est de 300W.



(O. Corpace /IRFU)

Electronique déportée: Mesures des intensités faisceau



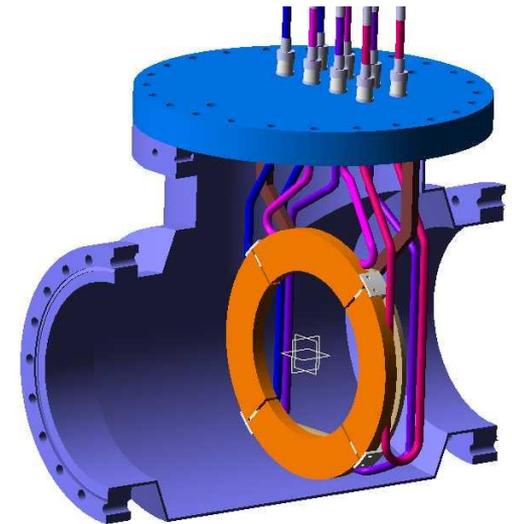
## Anneaux de pertes

- ✓ Principe: Les anneaux de pertes sont définis pour collecter les pertes faisceau le long de la ligne LHE.
- ✓ Le diamètre entre 90 et 110 mm est défini en fonction de la taille du faisceau sur la ligne LHE
- ✓ la puissance maximum est de 50W.
- ✓ Le courant mesuré est contrôlé pour arrêter le faisceau en cas de dépassement de seuil



## Collimateur segmenté

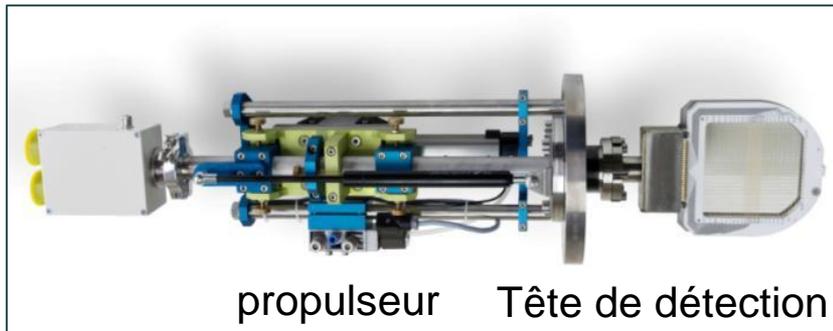
- ✓ Principe: Un anneau segmenté en 4 parties mesure les pertes du faisceau. Il permet un contrôle de la position et de la taille
- ✓ Le collimateur permet de surveiller le faisceau qui arrive sur l'AF Linac



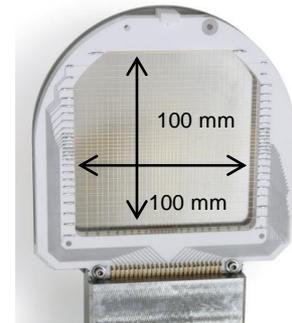
(E. Schibler/IPNL)

- ✓ Principe: 47 fils dans les 2 plans sont insérés dans le faisceau, l'interaction du faisceau sur les fils produit un courant électrique qui est mesuré et visualisé
- ✓ Echelle d'intensité: qq nA à qq  $\mu$ A en continu
- ✓ Echelle d'énergie: quelques keV à 100 MeV/A

## Profileurs SPIRAL2

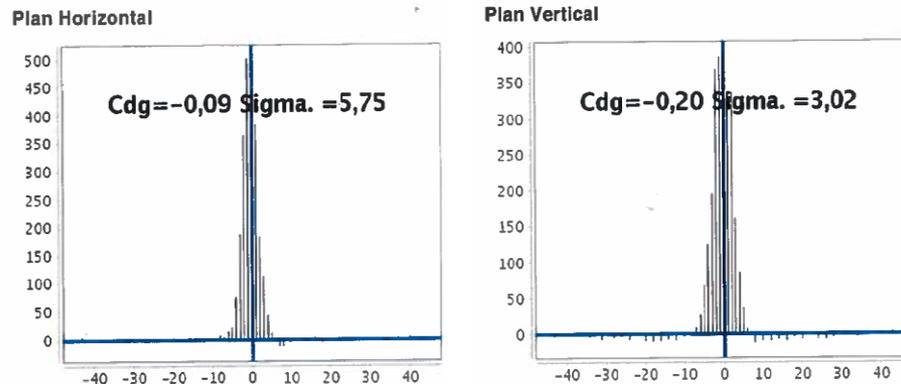


## Profileur



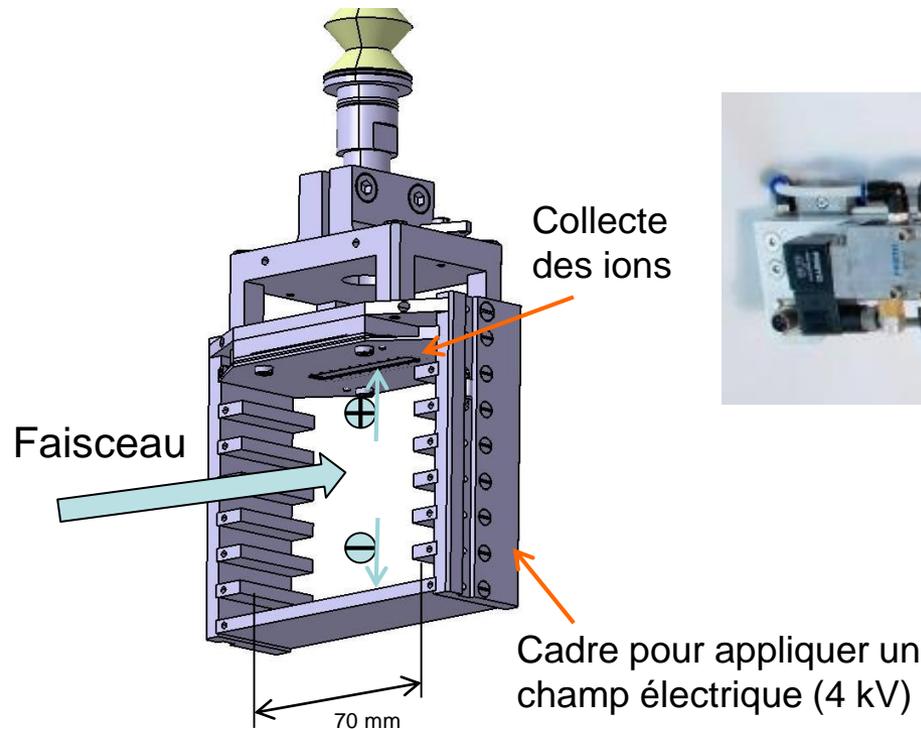
Fils de tungstène doré  
Diamètre : 70 et 150  $\mu$ m  
Ecart: 1,2 et 3 mm ou 1mm  
Electronique

- ✓ Ecrans de visualisation des profils

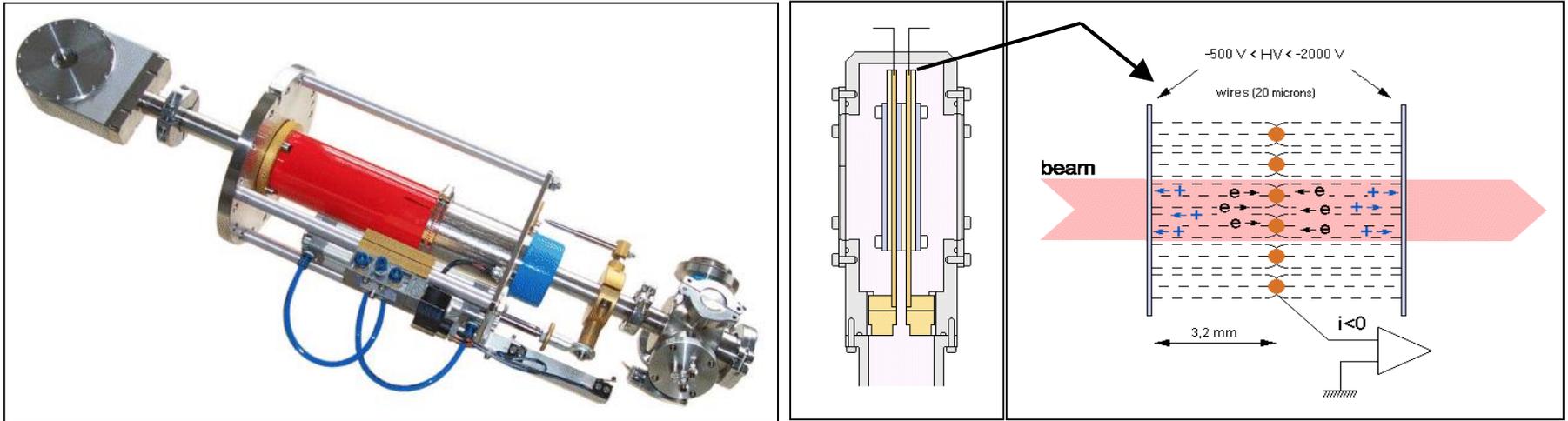


# Profileurs à Gaz résiduel

- ✓ Principe: Le faisceau ionise le gaz résiduel. Les ions sont collectés et mesurés en fonction de leur position
- ✓ Profileur monoplan d'ouverture 70 mm x 70 mm
- ✓ Intensité min d'utilisation :  $\sim 10 \mu\text{A}$  à  $10^{-8}$  mBar
- ✓ pression minimum requise :  $\sim 10^{-6}$  mBar

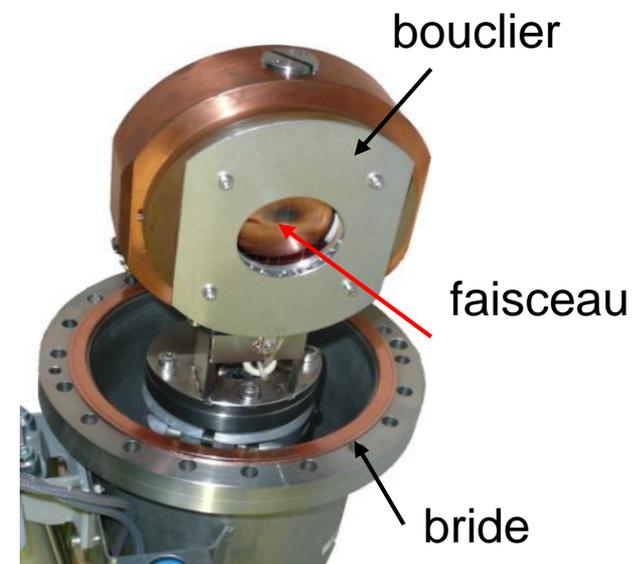
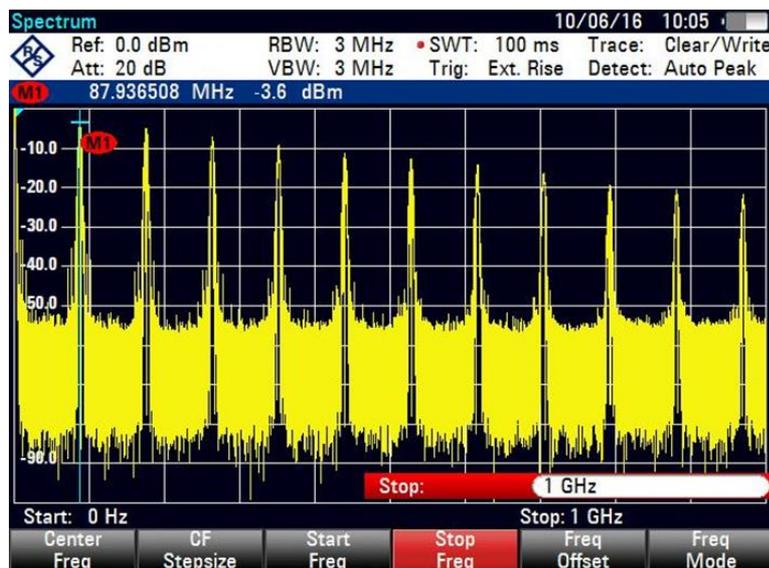


- ✓ Principe: Le faisceau ionise le gaz circulant dans une chambre d'ionisation. Les électrons sont collectés et mesurés sur des fils.
- ✓ Echelle d'intensités:  $10^2$  to  $10^9$  pps
- ✓ Echelle d'énergie: à partir de 3 MeV/A
- ✓ Fonctionnement en faisceaux radioactifs après CIME

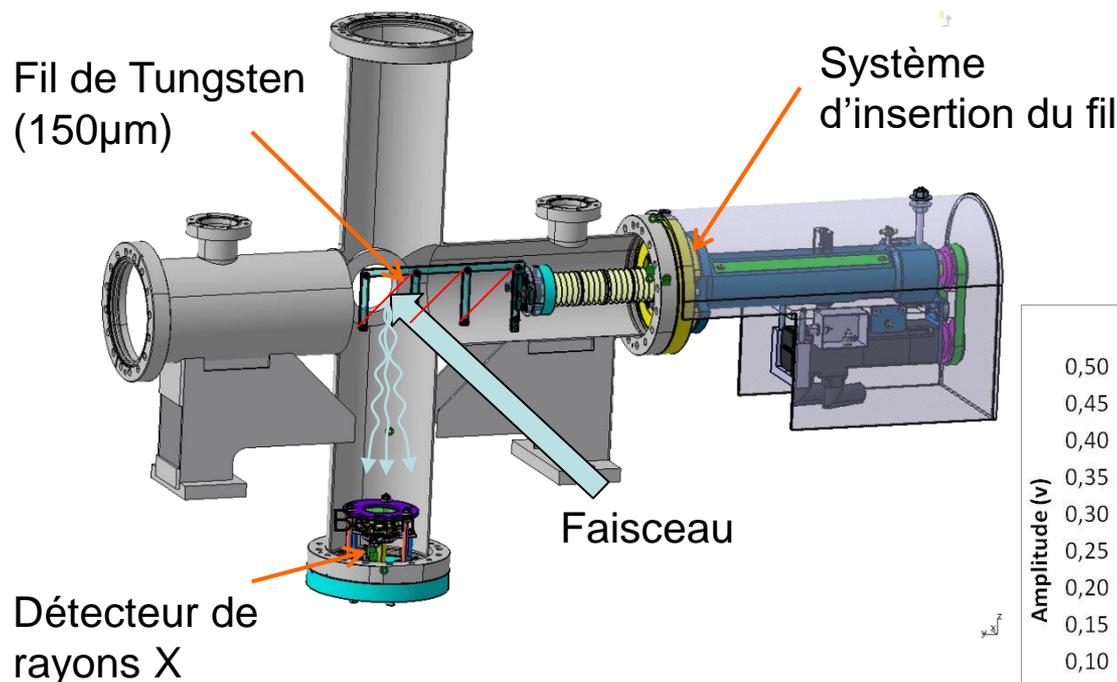


*Profileur à gaz: Vue et principe de fonctionnement*

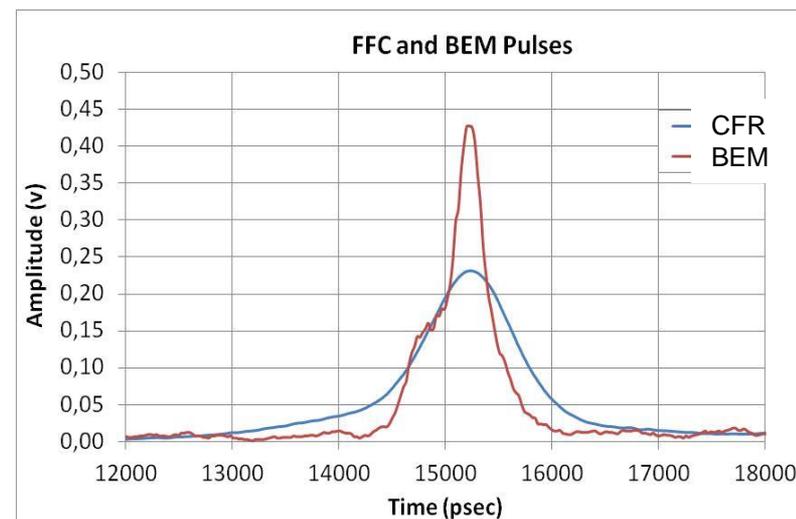
- ✓ Sur SPIRAL2, nous avons deux types de diagnostics qui permettent de visualiser la forme longitudinale du faisceau.
- ✓ Coupelle de Faraday rapide (CFR)
- ✓ Principe: Les ions sont collectés sur une coupelle de faraday spéciale, conçue pour avoir une grande bande passante
  - ✓ Diamètre: 44 mm
  - ✓ Puissance max : 400 W
  - ✓ Bande passante : 2 GHz (-10 dBm)
- ✓ Spectre du signal en fréquence



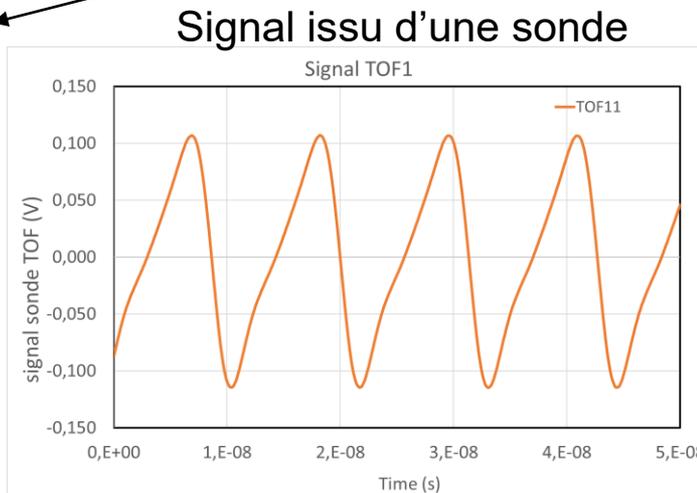
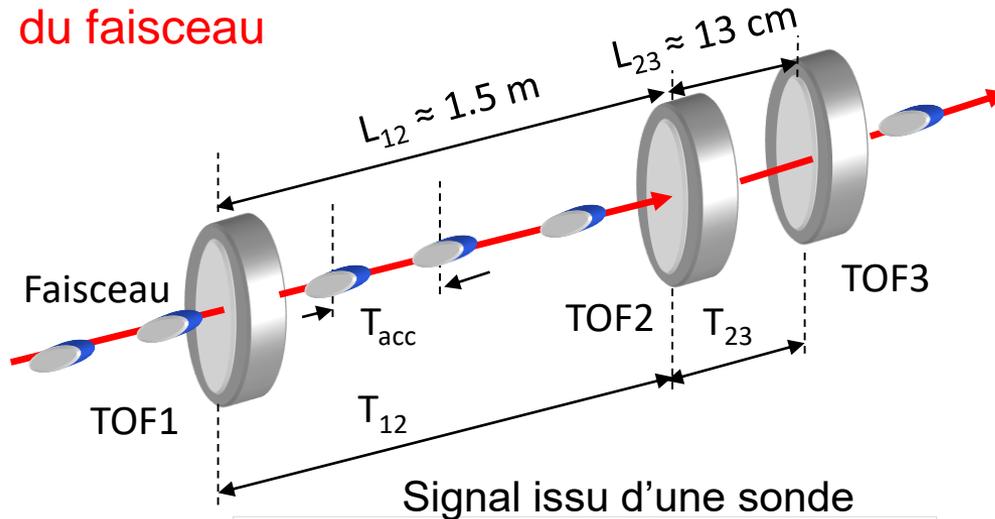
- ✓ Bunch Extension Monitor (BEM)
- ✓ Principe: La collision des paquets du faisceau sur un fil produit des rayons X qui sont détectés par une galette micro-canaux. Le comptage en fonction du temps des coups issus de la galette permet de reconstituer la forme temporelle du faisceau.



Comparaison des mesures longitudinales CFR et BEM



- ✓ Mesures par la méthode du temps de vol (TOF : Time of Flight)
- ✓ Principe: Le champ électrique produit par les paquets génère des signaux impulsionnels sur 3 sondes de phase. Les déphasages des 3 signaux sont utilisés pour calculer le temps de vol des paquets, la vitesse puis l'énergie du faisceau

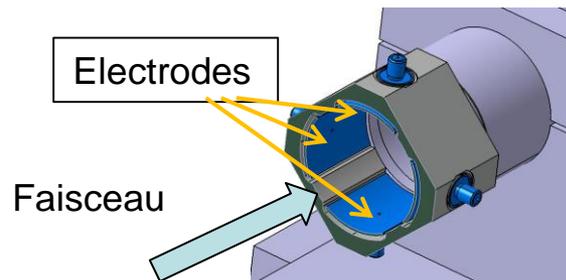
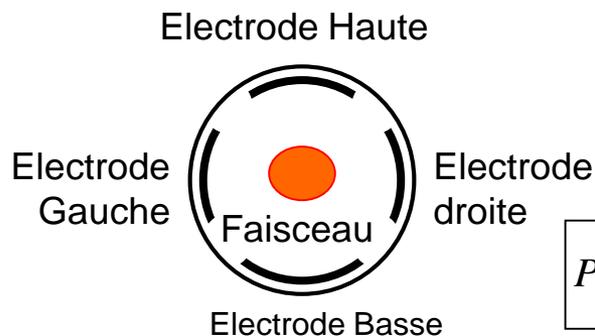


- ✓ Principe: Le champ électrique des paquets d'ions génère des signaux impulsionnels sur les 4 électrodes du BPM . L'amplitude des signaux est utilisé pour mesurer la position, la phase et l'ellipticité du faisceau.

Les spécifications techniques des chaines BPM sont:

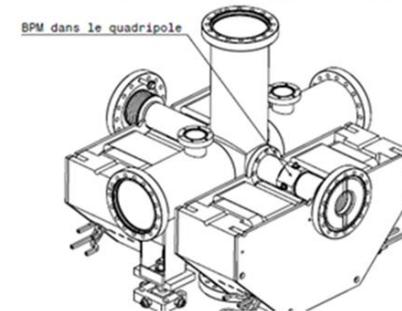
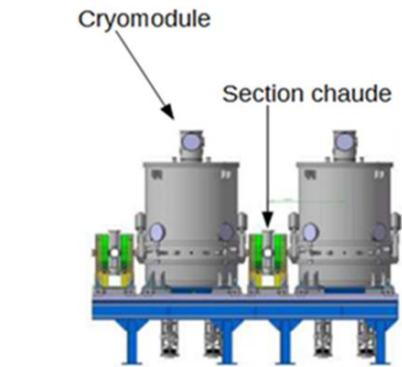
- ✓ Gamme de fonctionnement de 150  $\mu$ A à 5 mA
- ✓ Gamme de mesure de la position:  $\pm 20$  mm
- ✓ Mesure de position :  $\leq 150\mu$ m
- ✓ Résolution : 50  $\mu$ m
- ✓ Mesure d'ellipticité :  $\pm 20\%$  ou  $\pm 1,2\text{mm}^2$
- ✓ Mesure en phase:  $\pm 0,5^\circ$

## Mesures de position



$$PositionX = kp * \frac{(R - L)}{R + L + U + D}$$

$$PositionY = kp * \frac{(U - D)}{R + L + U + D}$$



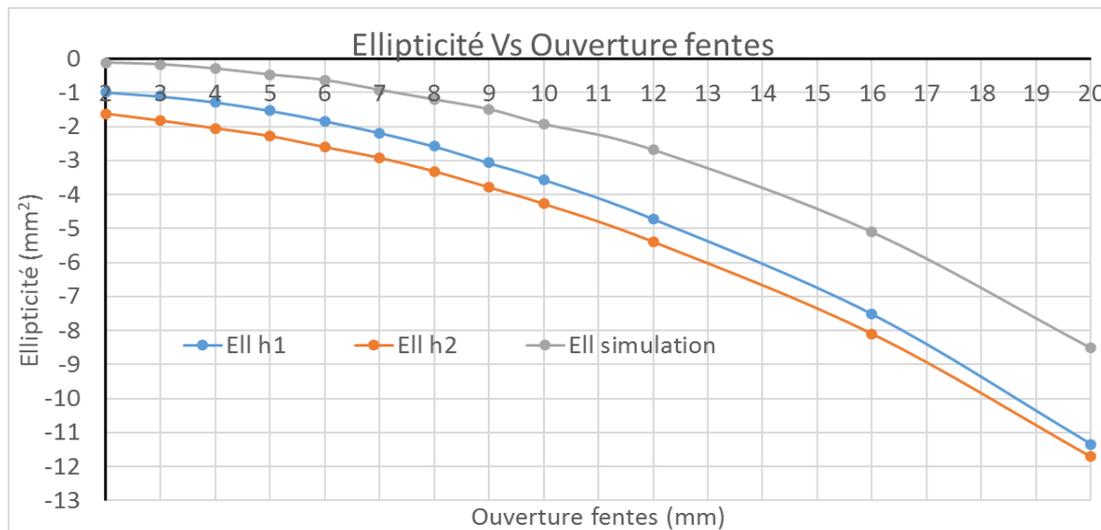
## Mesures d'ellipticité

L'ellipticité est calculée avec la formule suivante

$$\sigma_x^2 - \sigma_y^2 = ke * \frac{(R+L) - (U+D)}{R+L+U+D} - (X^2 - Y^2)$$

Un faisceau rond donne une valeur d'ellipticité de zéro.

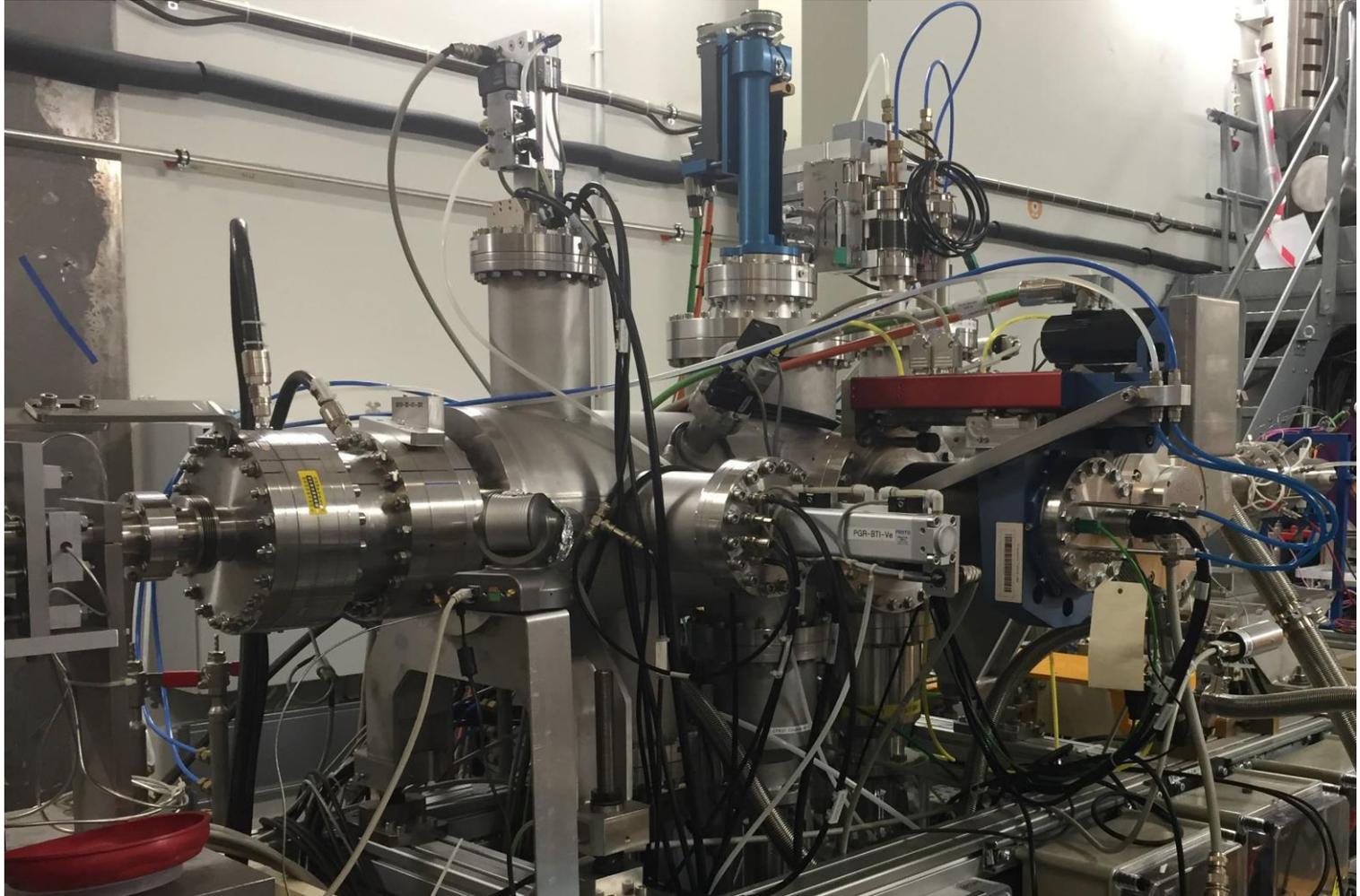
Mesure d'ellipticité du faisceau dans le BTI en fonction de l'ouverture de fentes



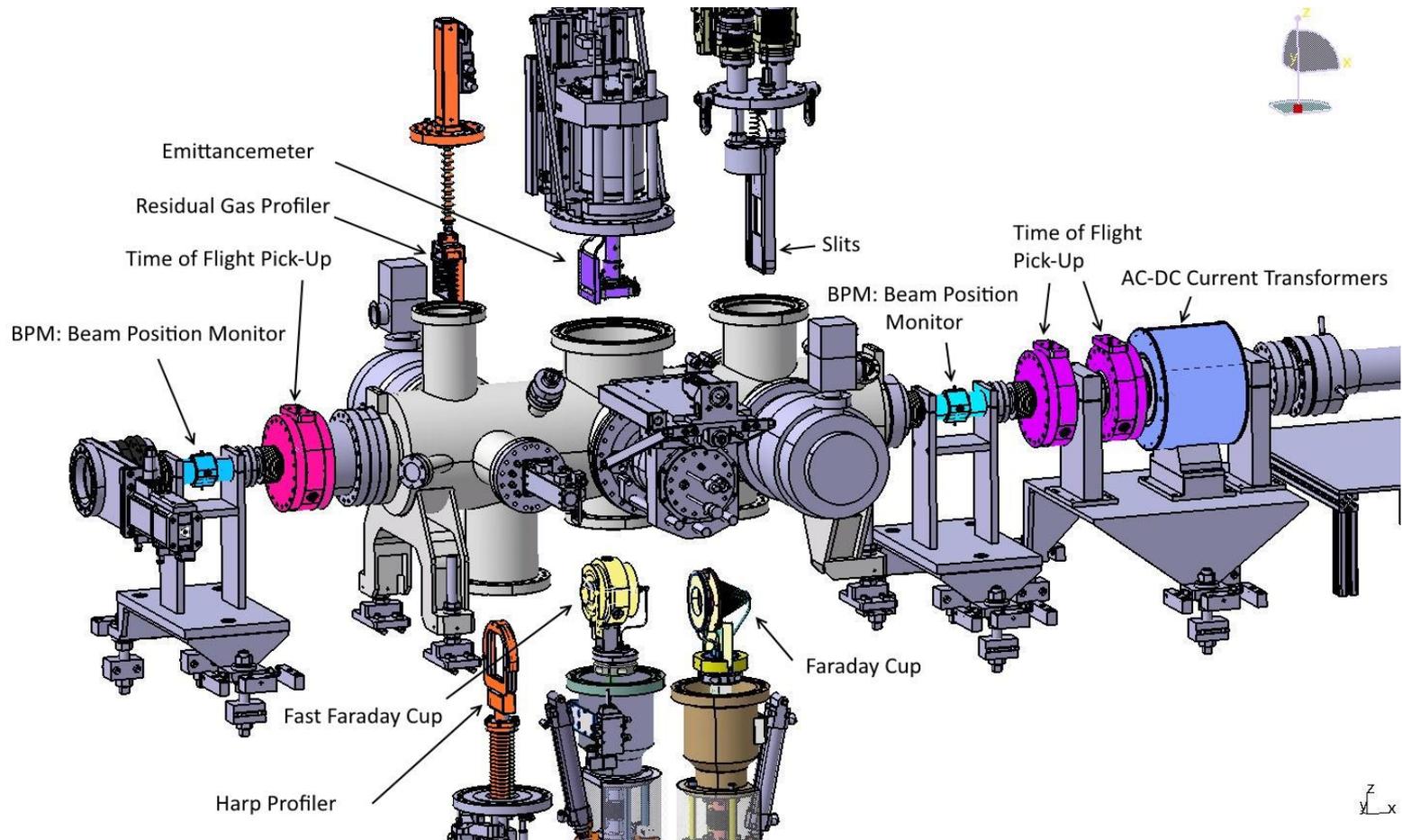
## Mesures de phase

Les phases des harmoniques 1 et 2 des impulsions BPM sont mesurées par rapport à la référence RF de SPIRAL2 de 88 MHz.

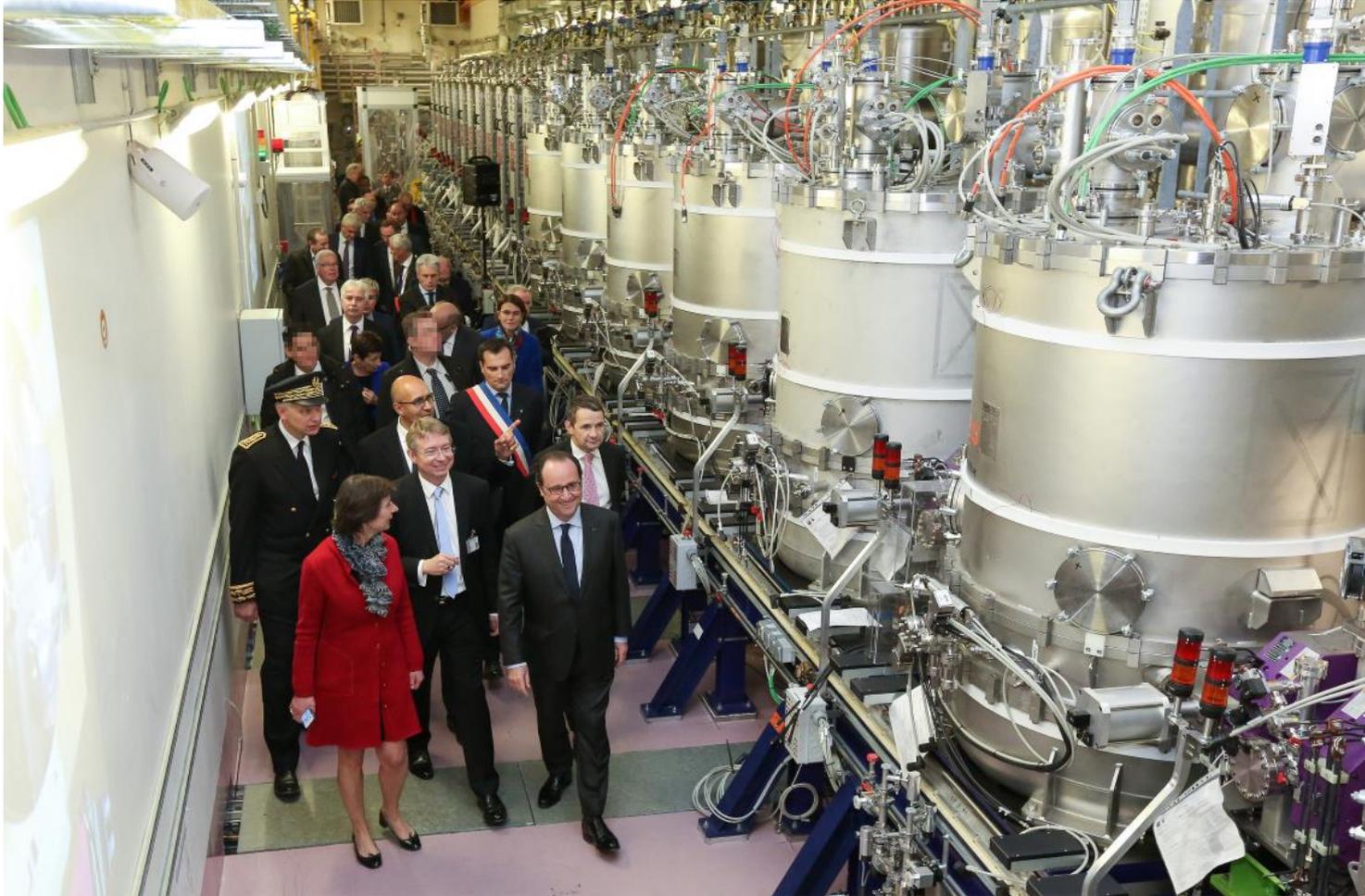
- ✓ Photo du Banc de Test Intermédiaire (BTI) à la sortie du RFQ de SPIRAL2 (en lieu et place de la LME)



- ✓ Vue des diagnostics extraits de leur emplacement



- ✓ Les chaines diagnostics de contrôle et de surveillance
  - ✓ Des intensités et des rendements de transmission avec un intégrateur glissant
  - ✓ De l'énergie du faisceau
  
- ✓ Les chaines de contrôle et de surveillance
  - ✓ Les calculs d'incertitudes des chaines de mesure
  - ✓ Des analyses de mode de défaillance (AMDE)
  - ✓ Tests intéressants la sureté
  - ✓ Contrôle d'essais périodiques (CEP)



**Merci pour votre attention**

Conference IBIC 2019 Malmö, Sweden : <http://www.ibic2019.org/>