

FROM RESEARCH TO INDUSTRY



[www.cea.fr](http://www.cea.fr)

# LES SOURCES COMPACTES DE NEUTRONS: ACCÉLÉRATEURS ET CIBLES

N. Pichoff  
J. Schwindling

CEA / DRF / IRFU

Journées Accélérateurs, 04/10/2019



# DES NEUTRONS: POUR QUOI FAIRE ?

- Diffusion neutronique pour étude de la matière:
  - chimie, systèmes magnétiques et supraconducteurs, sciences des matériaux (polymères, cristaux liquides, composites, métallurgie), biologie...
- Imagerie neutronique (neutronographie...)
  - Composants pyrotechniques, piles à combustibles, batteries
- Tenue aux radiations de composants électroniques
- Mesure de sections efficaces pour amélioration des données nucléaires, tests de matériaux pour centrales nucléaires (contrôle aciers cuves, ODS)
- Domaine médical: production de radioéléments, thérapie par capture de neutrons (BNCT)
- Analyse par activation neutronique

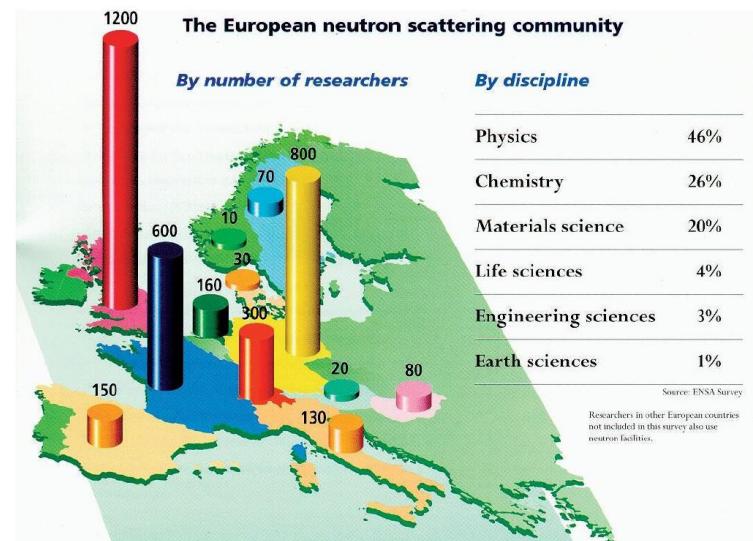
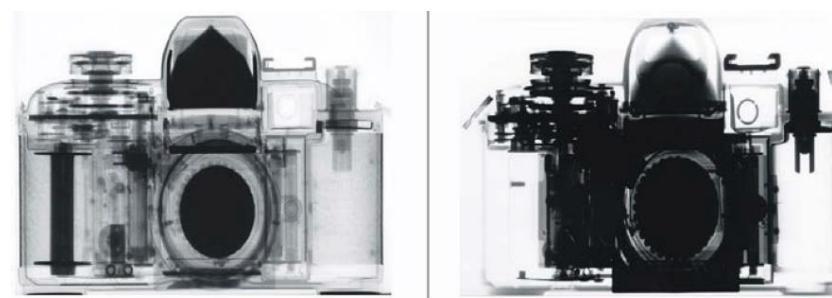


FIG. 9.1. Distribution of neutron users across European States and scientific disciplines (courtesy of the European Spallation Source Council).



Comparaison neutronographie et radiographie

Source: IAEA Nuclear Energy Series No NP-T-5.3

# OÙ TROUVER DES NEUTRONS ?

- **Réacteurs de recherche:**
  - ~ 270 réacteurs de recherche vieillissants<sup>(1)</sup>
  - En France, arrêt du réacteur Orphée fin octobre 2019
  - Remplacement difficile (non-prolifération, acceptabilité, coût...)
- **Sources de spallation:**
  - Exemples: SINQ, ISIS, SNS, ESS
  - Flux de neutrons élevé
  - Coût élevé
- **Sources compactes:**
  - Exemples: LENS (USA), RANS (Japon)
  - Flexibilité
  - Coût raisonnable (ques 10 M€ - ques 100 M€)

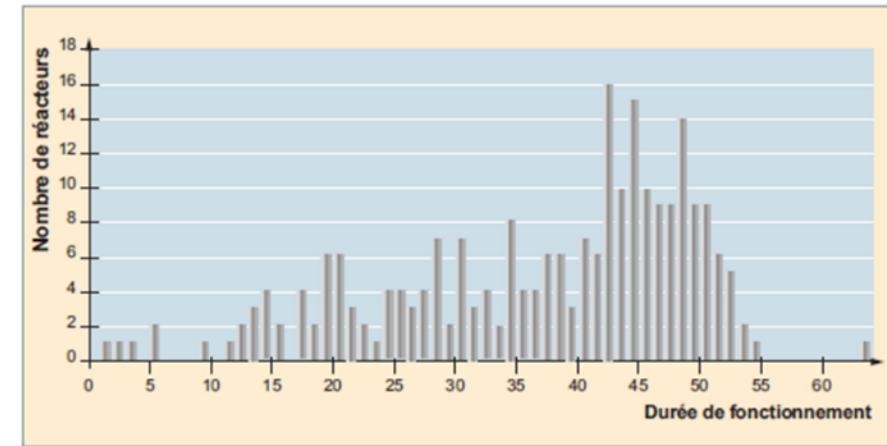
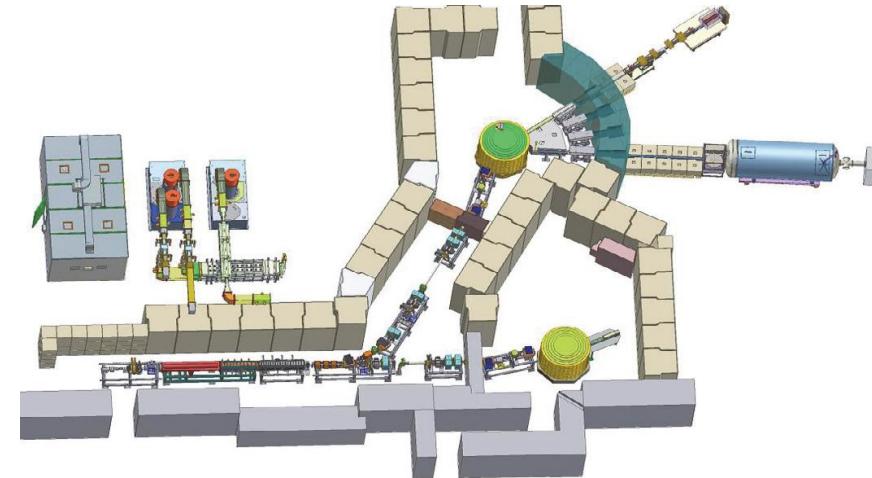


Fig. 135. Âge des réacteurs expérimentaux en service dans le monde.



LENS, Univ. Indiana  
Protons 13 MeV, 25 mA, 1.8% (6 kW)  
RFQ 3 MeV, DTL 4 MeV + 6 MeV

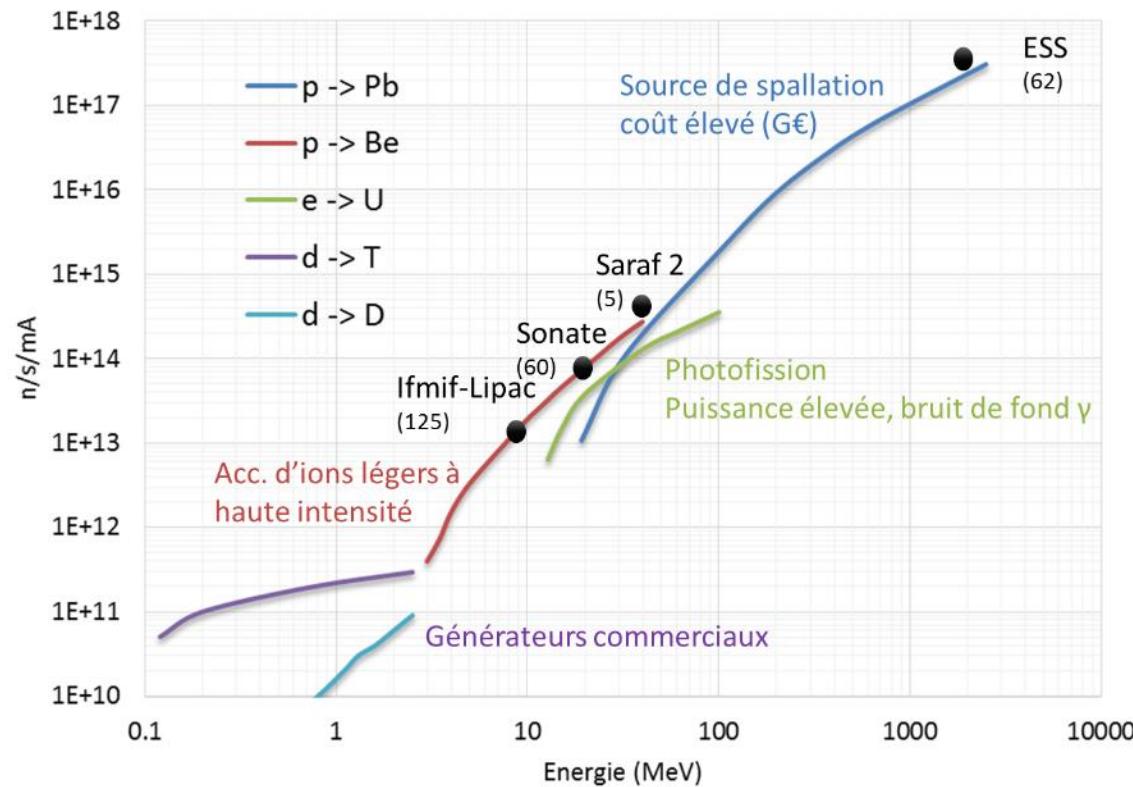
(1) [Research reactor database](http://www.indiana.edu/~lens/publications.html), AIEA, Janvier 2017

# LES SOURCES COMPACTES DE NEUTRONS (CANS)

Accélérateurs de protons ou deutons

Energie **que** MeV (BNCT) → 70 MeV (projet HBS allemand)

Faisceau **continu** (BNCT, imagerie,...) ou **pulsé** (diffusion neutronique,...)



Deux exemples dans cet exposé:

## Projet SONATE (France)

- Protons
- 60 - 100 mA, 20 - 30 MeV
- Cycle utile ~4%
- Cible Be 50 – 80 kW

## SARAF (Israël)

- Deutons
- 5 mA, 40 MeV
- CW
- Cible Lithium liquide 200 kW



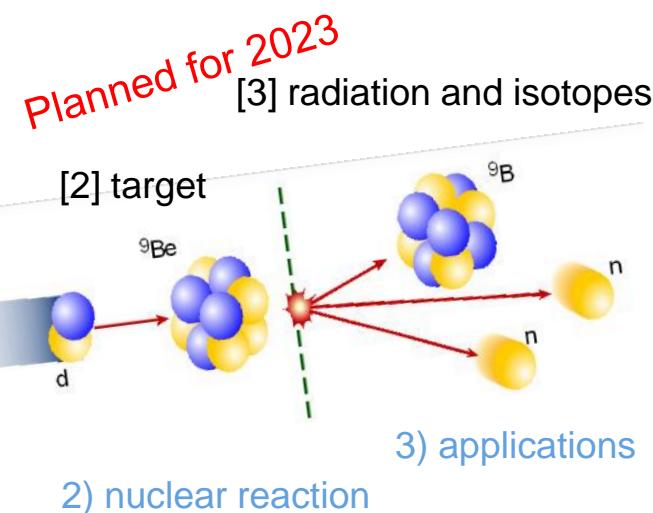
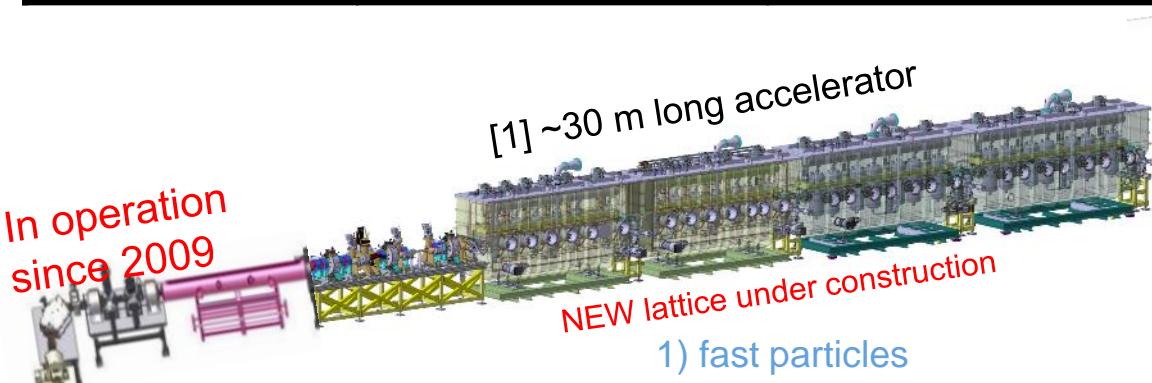
Soreq Applied Research Accelerator Facility

# SARAF

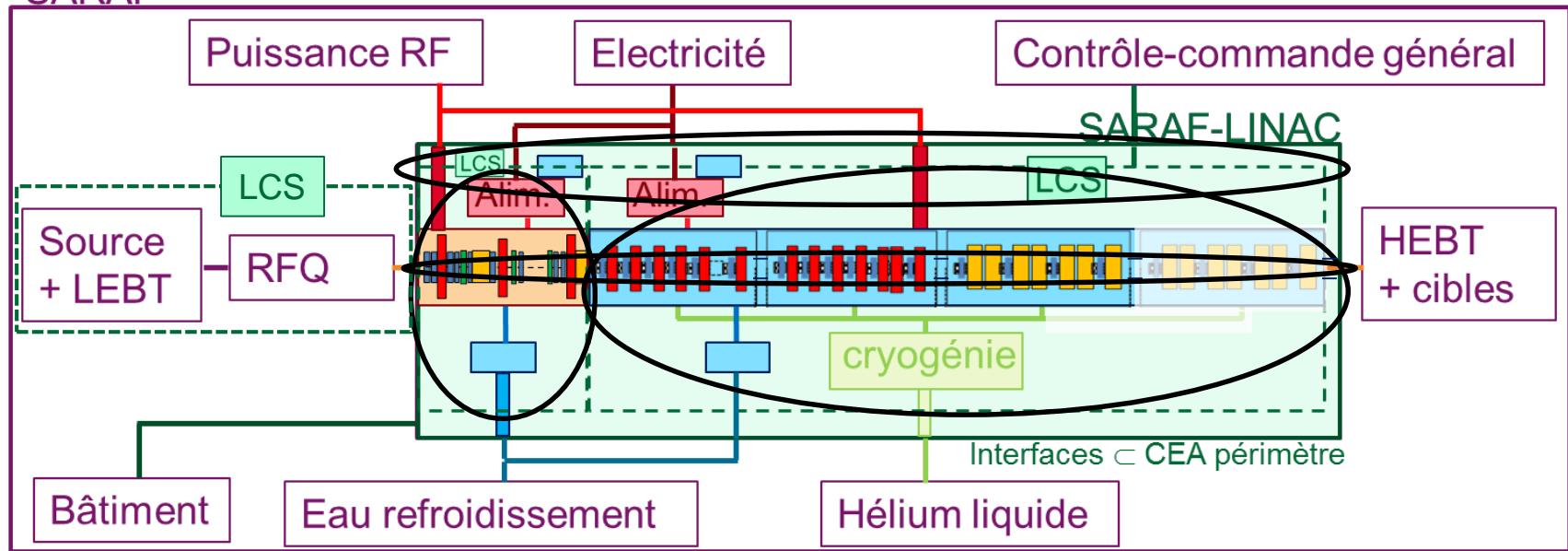
## The Soreq Applied Research Accelerator Facility

- ❖ To enlarge the experimental nuclear science infrastructure and promote research in Israel
- ❖ To develop and produce radioisotopes for bio-medical applications
- ❖ To modernize the source of neutrons at Soreq and extend neutron based research and applications

Parameter	Value	Comment
Ion Species	Protons/Deuterons	$M/q \leq 2$
Energy Range	5 – 40 MeV	Variable energy
Current Range	0.04 – 5 mA	CW (and pulsed)
Maintenance	Hands-On	Very low beam loss



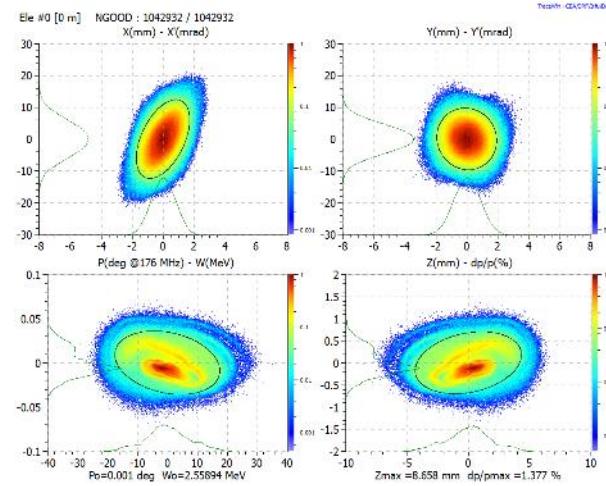
## SARAF



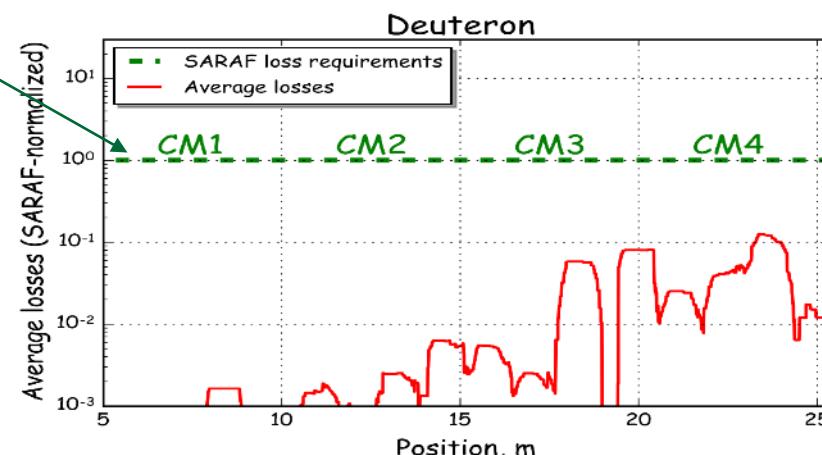
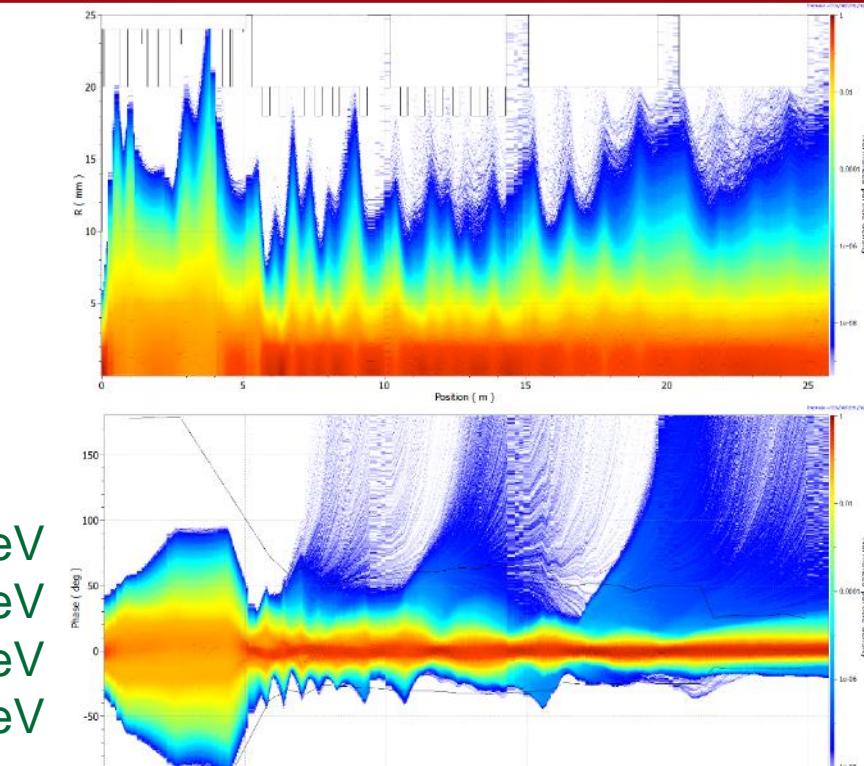
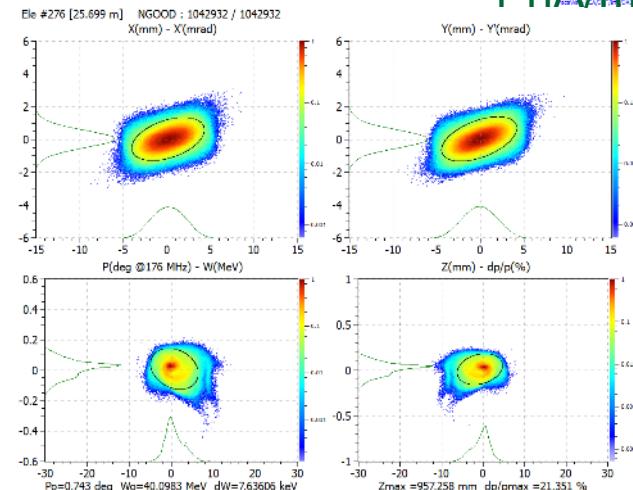
SARAF-LINAC est un composant de SARAF, constitué de 4 sous-systèmes :

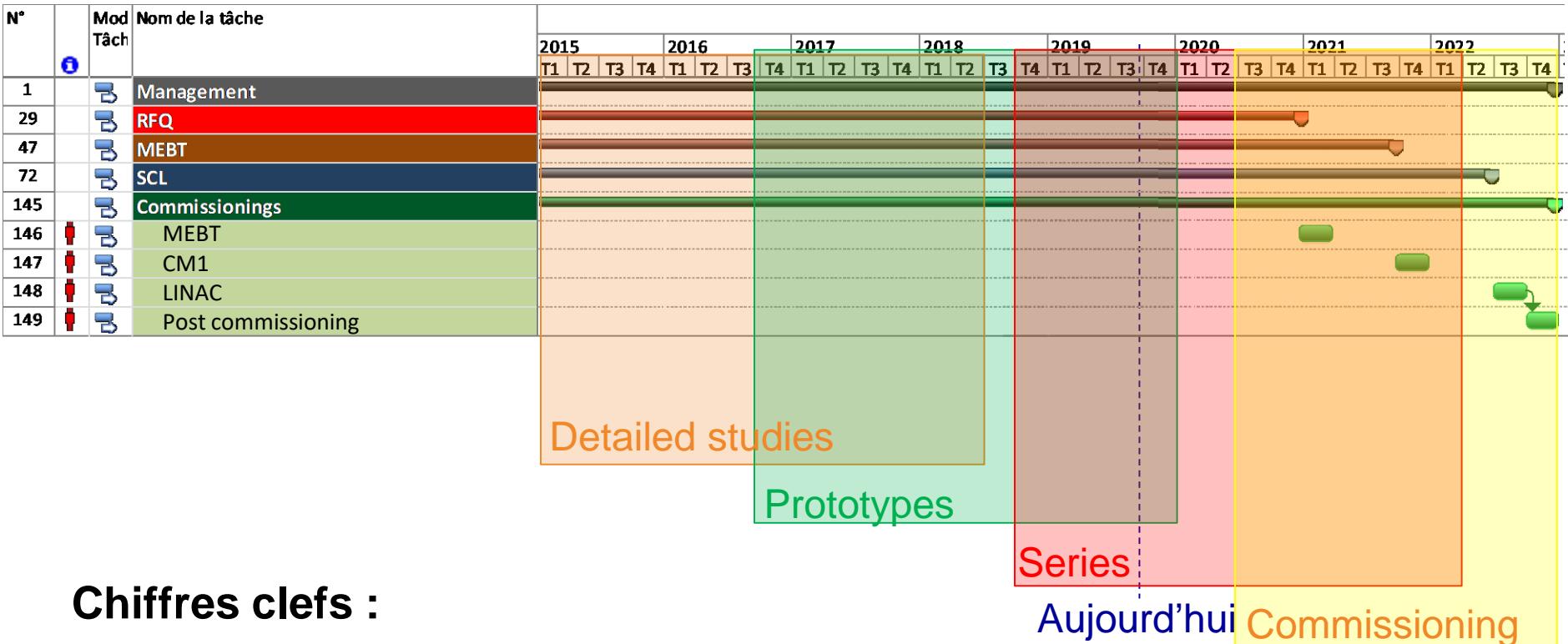
- La ligne moyenne énergie (MBT)
- L'accélérateur supra conducteur (SCL)
- Les diagnostics-faisceau (DIA)
- Le contrôle-commande (CCD)

# DYNAMIQUE ET PERTES FAISCEAU



150 nA/m @ < 5 MeV  
 40 nA/m @ < 10 MeV  
 5 nA/m @ < 20 MeV  
 1 nA/m @ > 20 MeV





## Chiffres clefs :

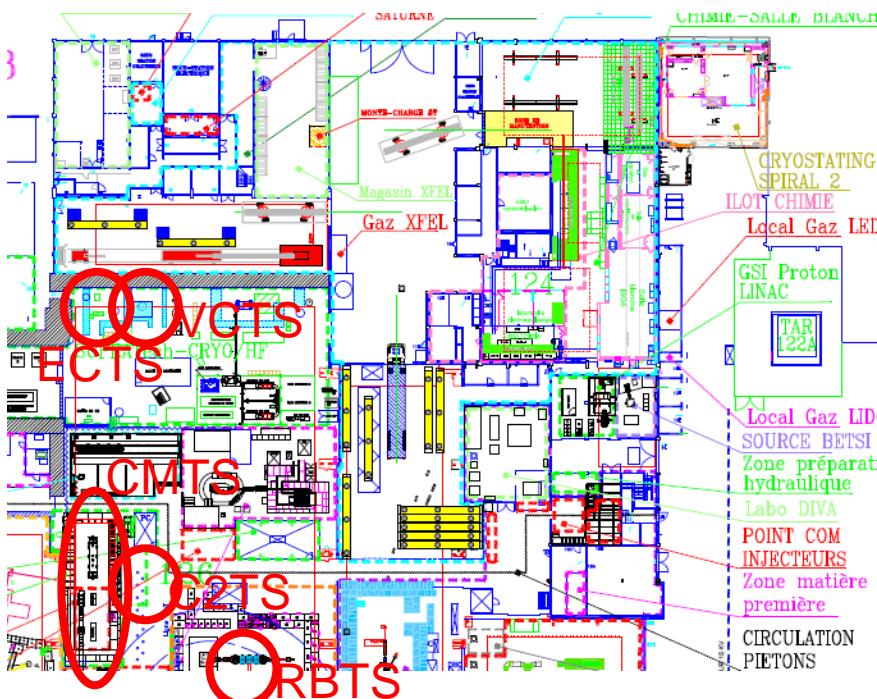
~ 8 ans

~ 160 h.an (~20 h.an/an)

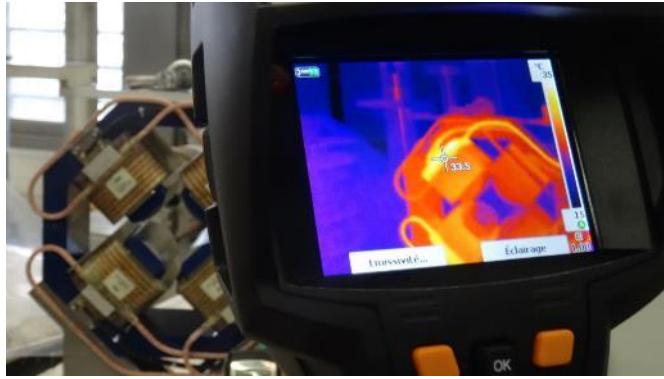
# BANCS DE TESTS SARAF

	2017					2018					2019					2020					2021															
	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	Jn	Jt	A	S	O	N	D
RBTS																				RB1																
METS																					RB2&3															
VCTS																PLB				PHB																
C2TS																				Protos																
ECTS																				PLB	PHB															
SPTS																				Proto																
CMTS																																				
Chimie X																PLB			PHB																	
SB 3x4																PLB			PHB																	
SB 4x7																																				

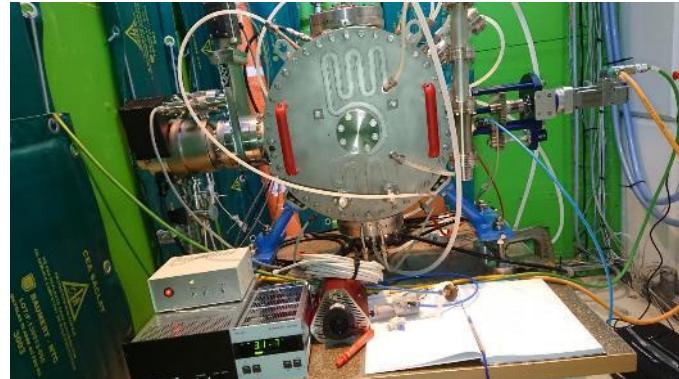
Aujourd'hui



- Plan de tests et d'intégration
- Adaptation des infrastructures
- Prototypes des systèmes CC
- Interactions avec les autres projets



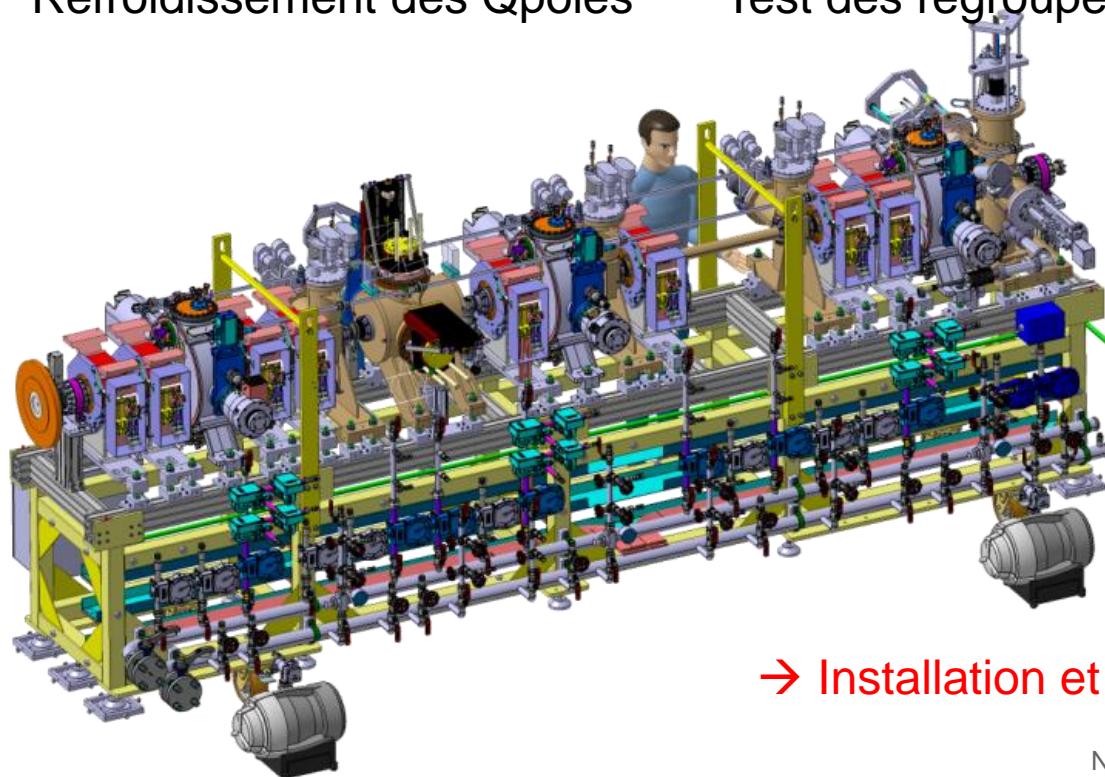
Refroidissement des Qpoles



Test des regroupeurs



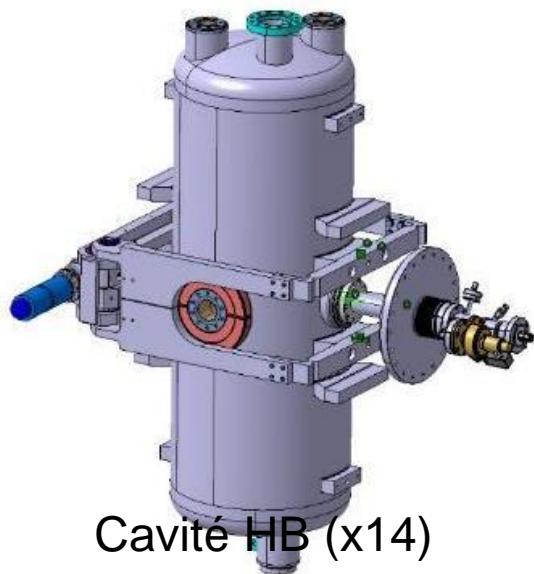
Regroupeurs



→ Installation et test METS S1-2020

## CAVITÉS

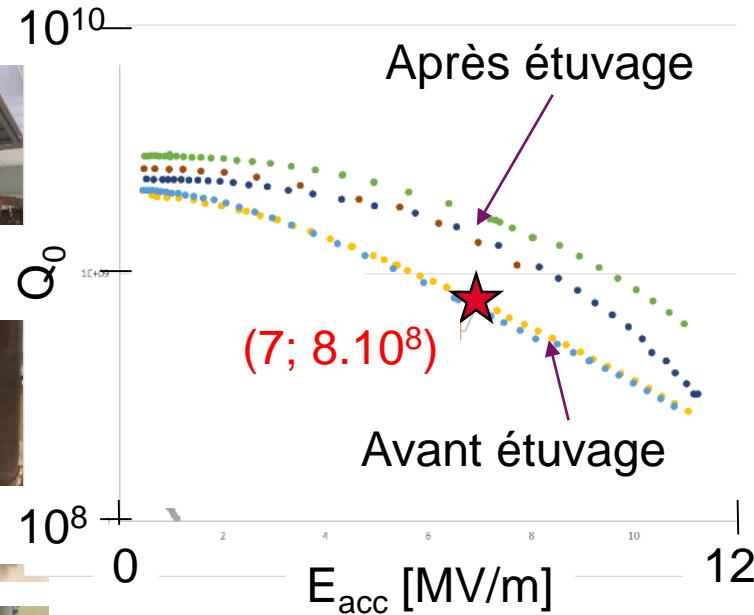
Donner l'énergie cinétique



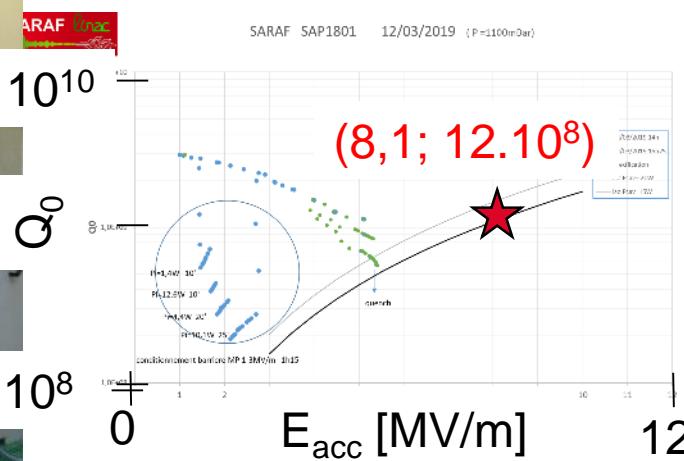
Cavité LB (x13)



Test en ECTS



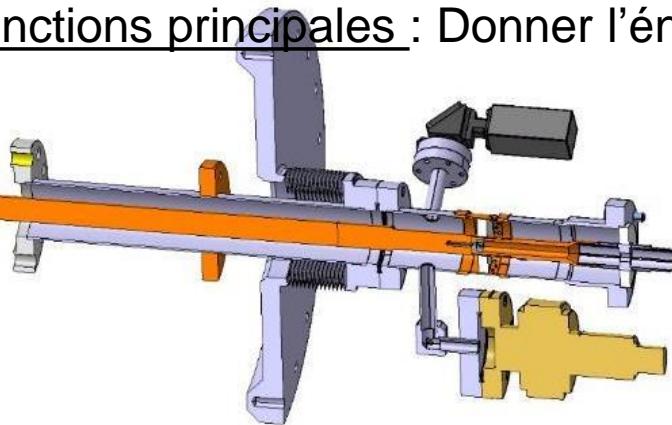
Préparation-Chimie



→ Nouveau prototype → Lancement fabrication série

# COUPLEURS/TUNERS

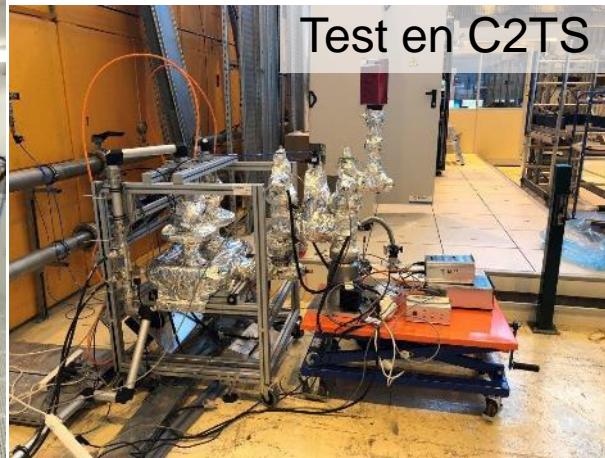
Injecter la puissance



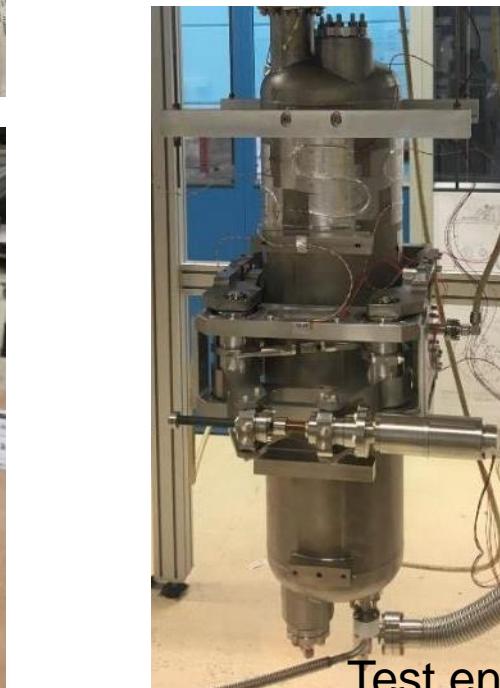
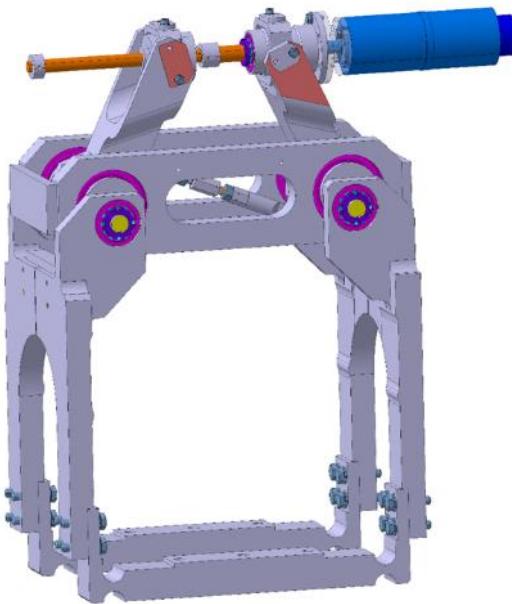
Montage SB



Test en C2TS



Ajuster la fréquence



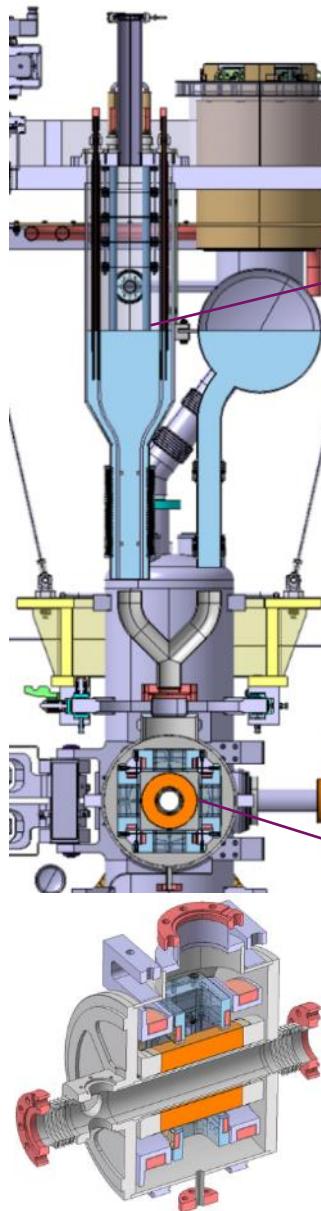
Test en ECTS

Prêt à utilisation

→ Lancement fabrication série

# SOLENOID PACKAGES

Contenir la taille transverse du faisceau



Amenée de courant (ADI)

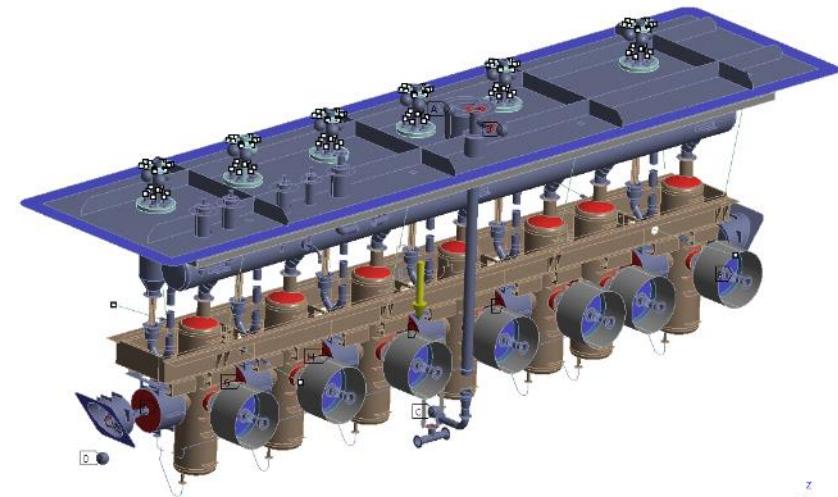
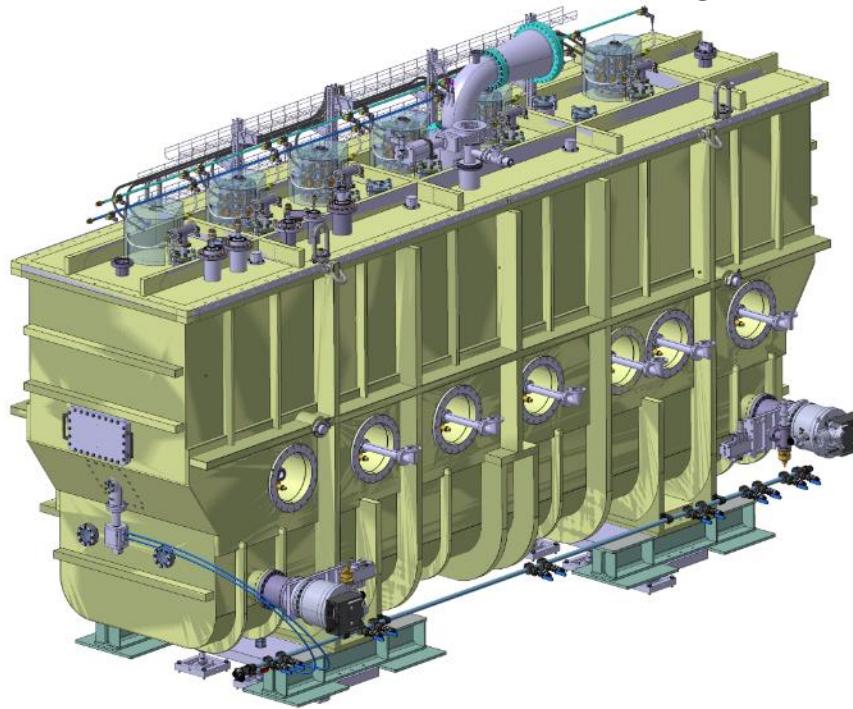


Solenoid package



Prêts pour le SPTS

→ Etudes terminées (reste outillage montage et transport)



→ Découpage en 8 marchés (principaux) :

- o Enceinte et bouclier thermique
- o Bouclier magnétique
- o Cadre support
- o Circuiterie cryogénie
- o MLI
- o Vide
- o Boites à vannes
- o Sections chaudes inter-cryomodules

→ Poster de Thomas Plaisant mercredi (dernier ;-))

Les activités de SARAF-LINAC avancent nominalement

Nous entrons en plein dans les fabrications de séries et les tests.

2020 : premières livraisons/installations de matériel en Israël (INJ-LCS + MEBT)

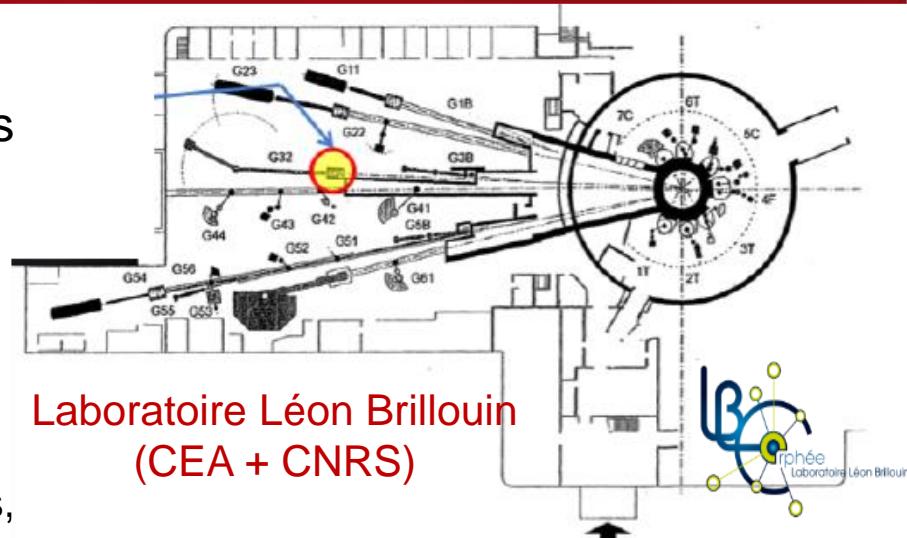


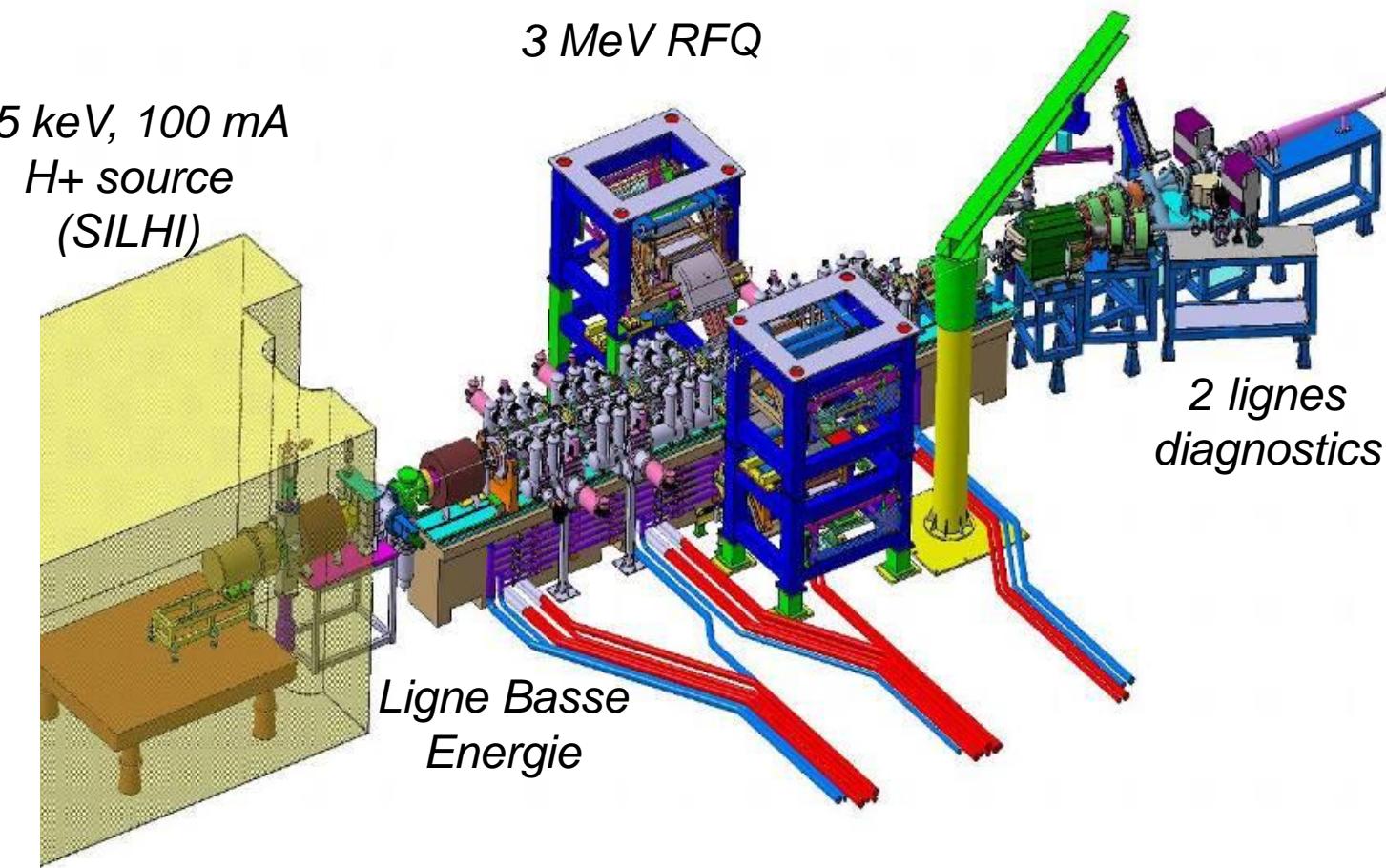
Source cOmpacte de Neutrons s'Appuyant  
sur la Technologie des accélératEurs

# LE PROJET SONATE

Groupe de travail commun IRFU – LLB depuis 2014:

- Définition d'une CANS pour remplacer une partie des activités auprès d'Orphée
  - Besoin pour la diffusion neutronique
  - Définition globale de l'accélérateur: protons, 60 - 100 mA, 20 – 30 MeV, Cycle utile ~4%,
  - Cible Be 50 – 80 kW
- R&D sur l'ensemble cible – modérateur – blindage: thermique, activation, implantation de protons...
- Contexte national et européen (projet HBS de Jülich en Allemagne, projets en Hongrie, Italie, Espagne...)





- Premiers faisceaux accélérés au printemps 2016
- Faisceau 7.2 kW le 19 octobre 2018 (3 MeV x 60 mA x 4 ms x 10 Hz)
- Breaking news: 60 kW (3 MeV x 50 mA x 8 ms / 20 ms) le 27 septembre 2019<sup>19</sup>

2017

IRFU / LLB

2019

IRFU / LLB / DEN

2020

≥ 2025

**CMR50**

Développement cible /  
modérateur

**IPHI - neutrons**

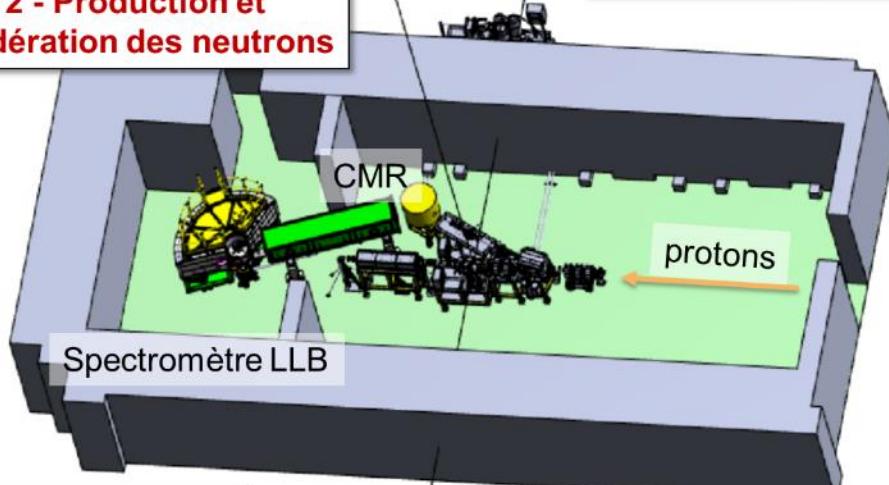
Upgrade accélérateur  
Instrument prototype

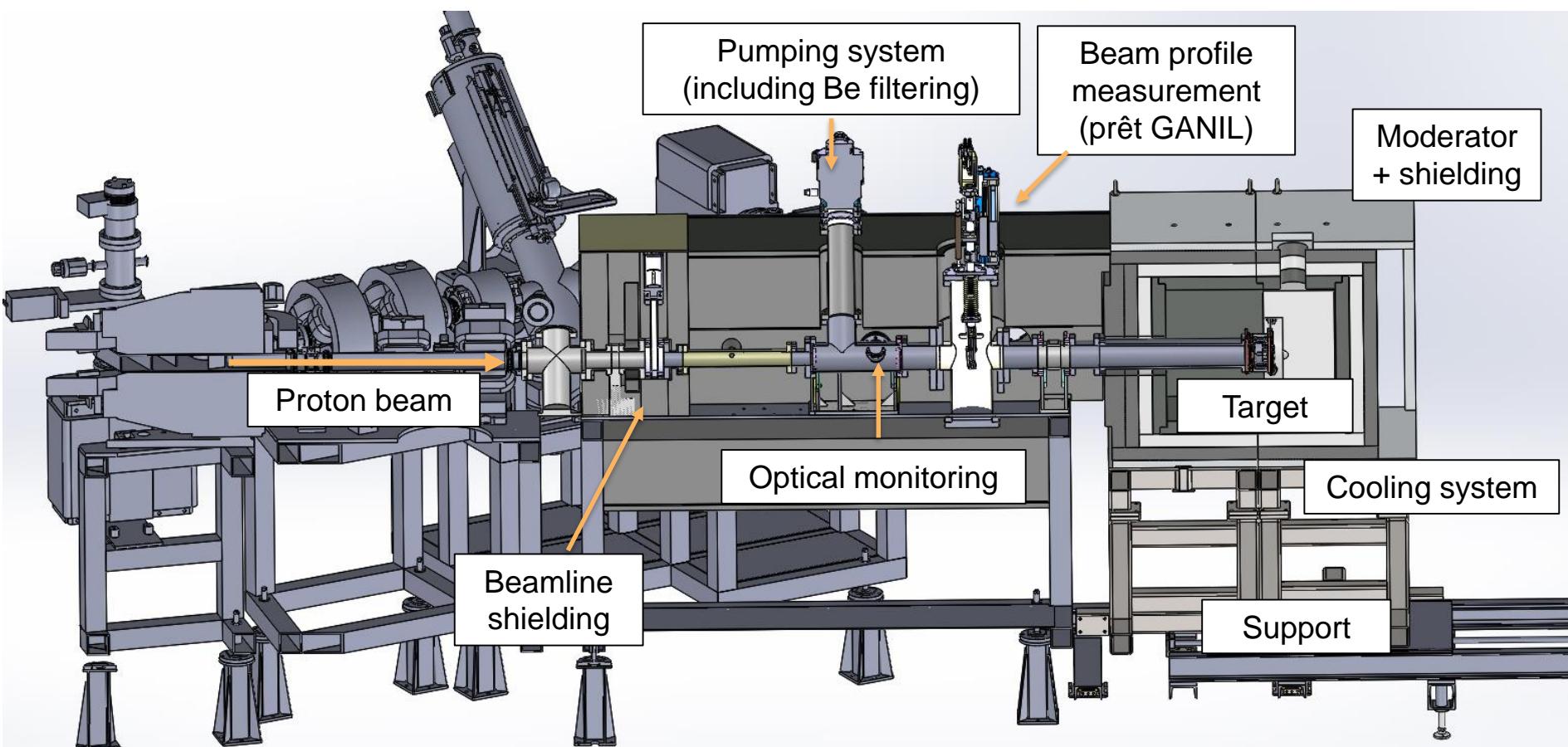
**SONATE**

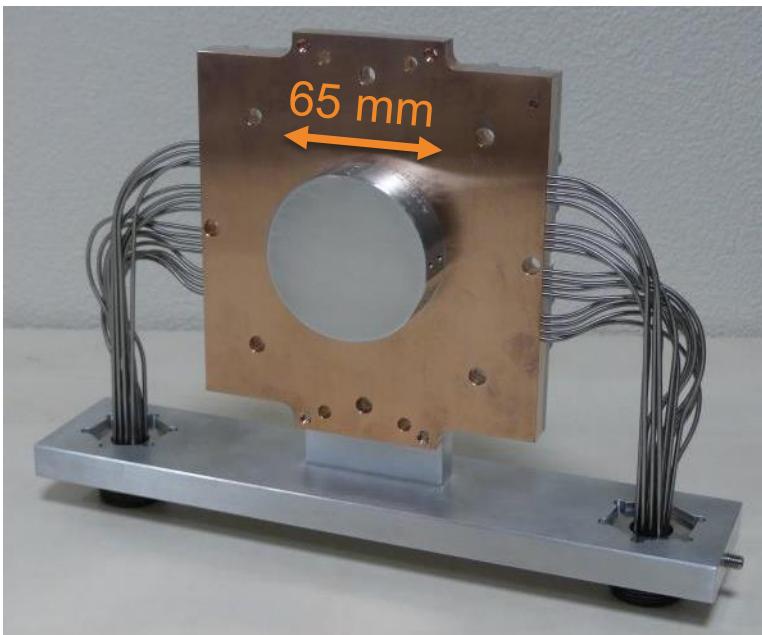
Installation dédiée  
2 cibles

**île de France**avec le soutien de P2I, PhOM et  
de l'Université Paris-Saclay

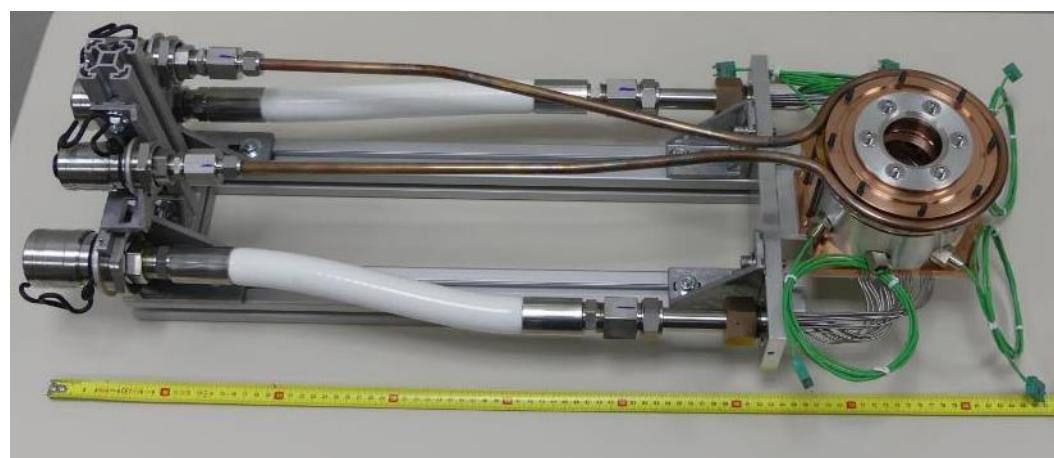
Budget total (hors MO) = 840 k€  
(50% CEA / 50% IdF)

**2 - Production et  
modération des neutrons****1 - Optimisation du  
faisceau de protons****3 - Utilisation des  
neutrons**





*Target screwed on the cooling plate*



*Target + collimator + water cooling + T measurement*

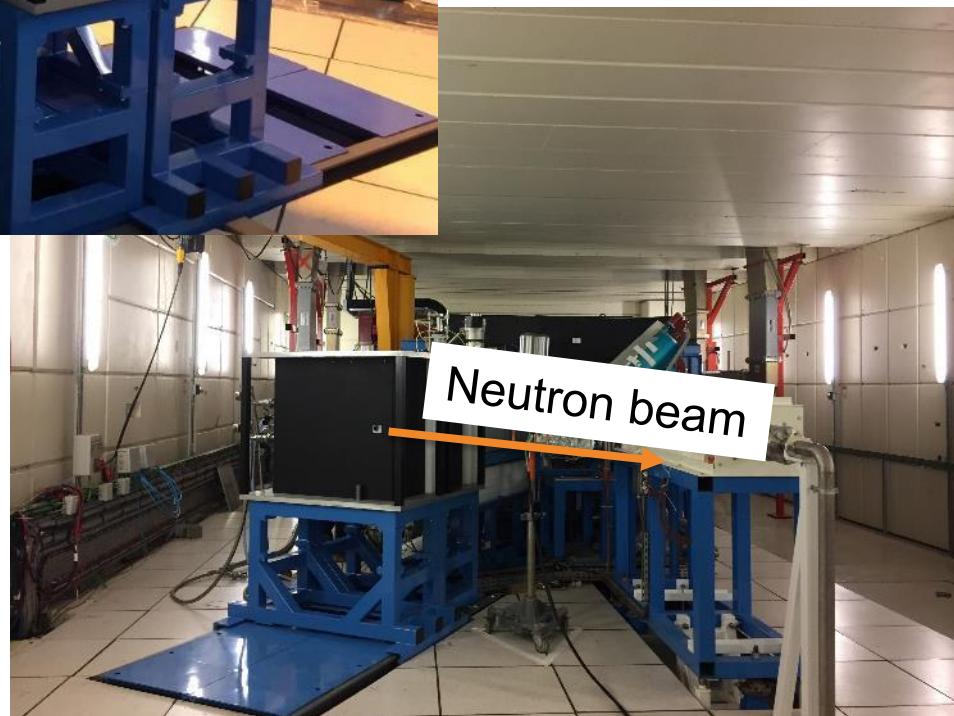
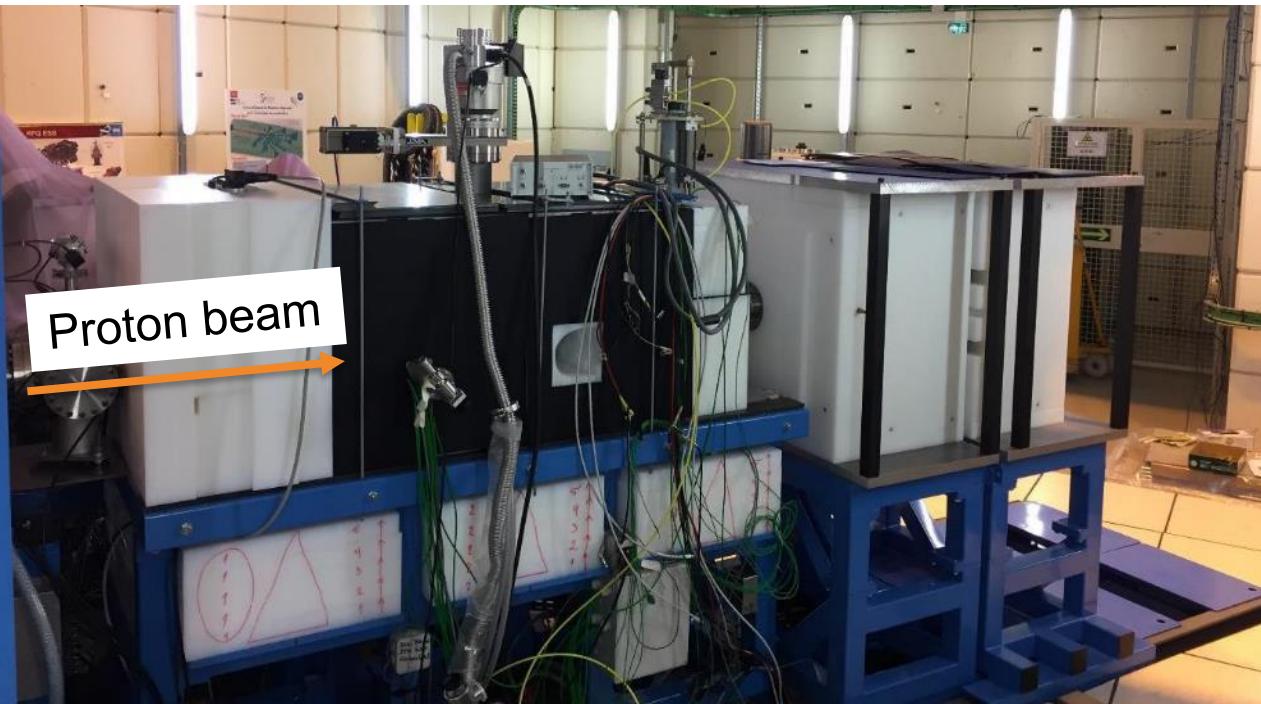


Densité de puissance max 0.5 kW / cm<sup>2</sup>

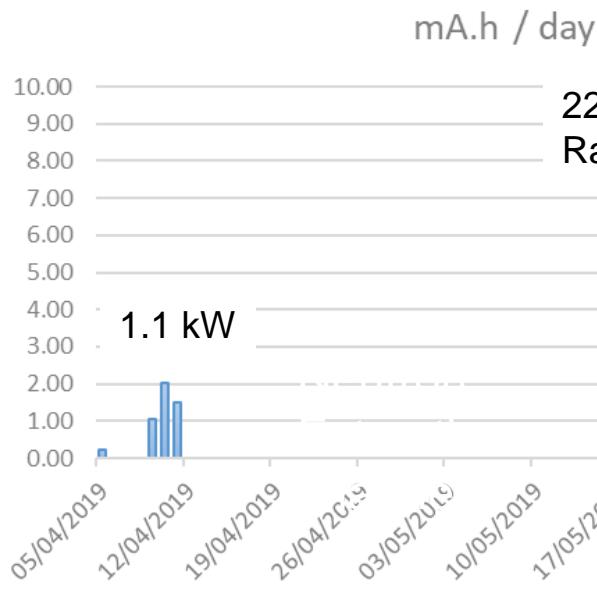
Cible épaisse (2 cm)  
→ Fonctionnement à 500 °C  
→ Améliorer la diffusion de l'hydrogène

*Target inside ½ shielding*

# FIN 2018 – DÉBUT 2019: INSTALLATION SUR IPHI



# RÉSULTATS TESTS À 3 KW

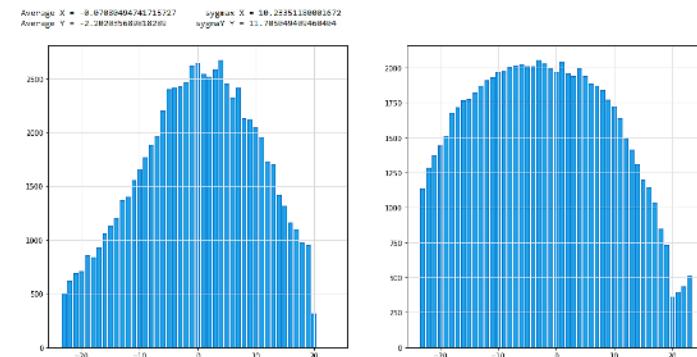


06/06:  
9 h uninterrupted

22/05:  
Raised to 3 kW

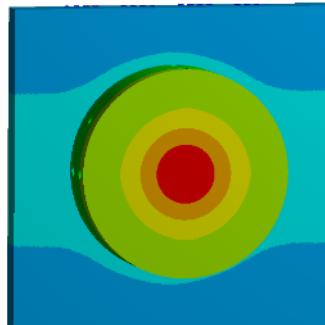
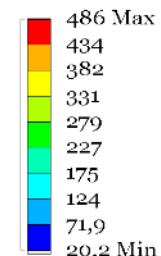
12/06:  
1h at 3.2 kW

*Mesure du profil faisceau*

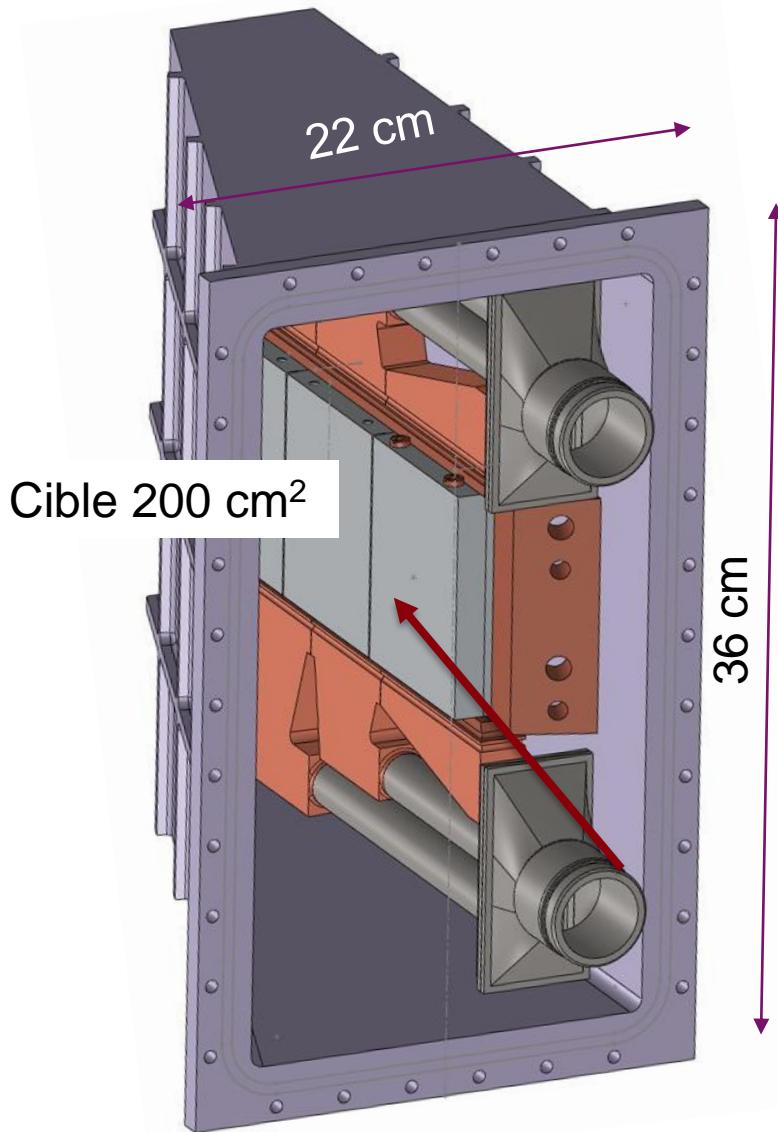


- 19 jours de faisceau, 97 runs
- 62 heures à plus de 1 kW, **47.7 heures à 3 kW**
- **Charge totale = 56.2 mA.h, 1.7E20 p/cm<sup>2</sup> (\*)**
- Faisceau: 20 mA x 2.85 ms / 57 ms (cycle utile 5%)
- Taille faisceau (RMS) = 10.5 mm horizontal x 11.5 mm vertical
- $P_{peak}^{max} \sim 8 \text{ kW/cm}^2$ ,  $\langle P \rangle^{max} \sim 400 \text{ W / cm}^2$  ( $\sim 650 \text{ W/cm}^2$ )
- Thermocouples 5 mm de la surface  $\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$
- Température moyenne en surface  $\sim 490 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T \pm 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- Arrêt pour conditionnement IPHI mais cible toujours opérationnelle

Type: Température  
Unité: °C  
Temps: 1



*Simulation thermique*

**1<sup>ère</sup> étape:**

- Taille faisceau x 1.7
- Cible inclinée à 20°

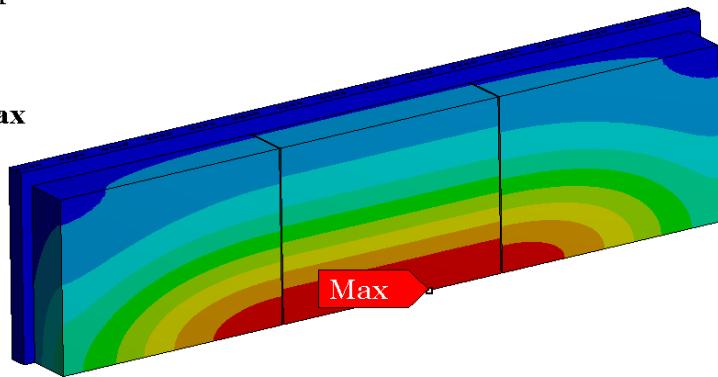
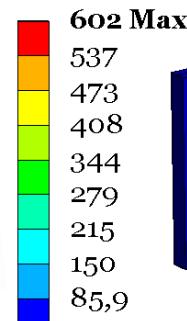
→ 30 kW

**2<sup>e</sup> étape:**

- Balayage horizontal du faisceau

→ 50 kW

Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1



# RÉSUMÉ

L'Irfu participe à de nombreux projets d'accélérateurs pour la production de neutrons (ESS, IFMIF, (Spiral2), SARAF2, SONATE)

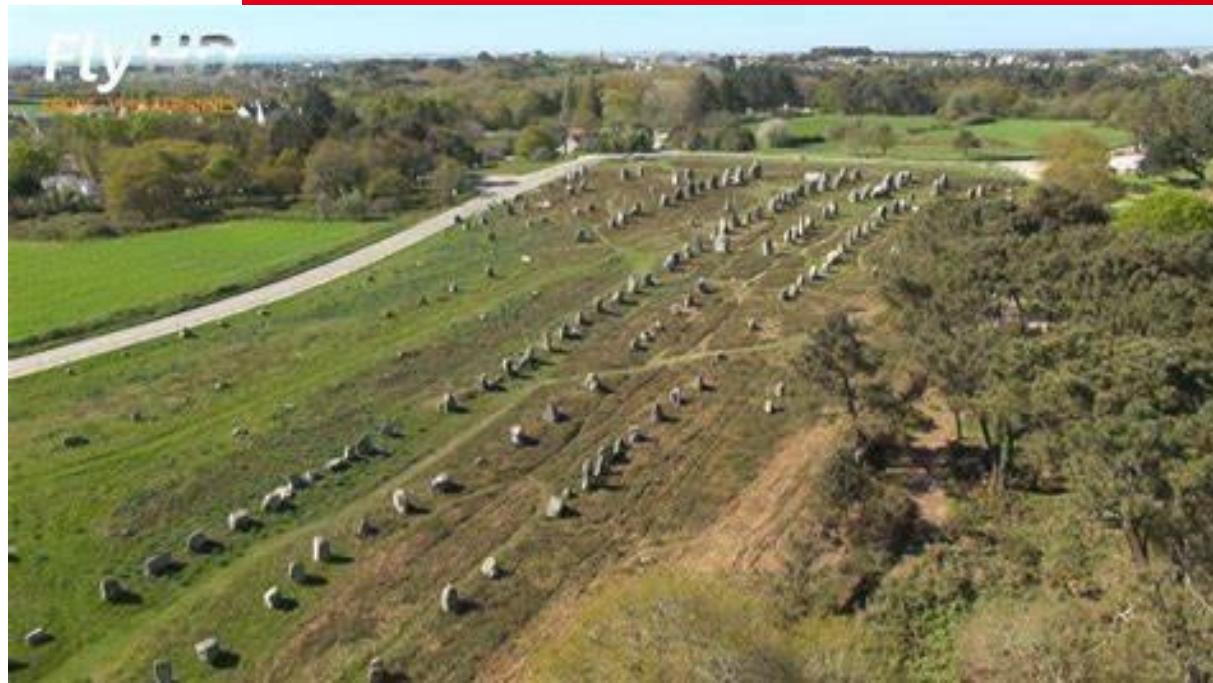
↑ présentation N. Bazin

Les activités de SARAF-LINAC avancent nominalement: fabrication de séries et tests. 2020: premières livraisons/installations de matériel en Israël (INJ-LCS + MEBT)

R&D avec le LLB sur un ensemble cible – modérateur 50 kW pour la production de neutrons thermiques. Tests à 3 kW encourageants

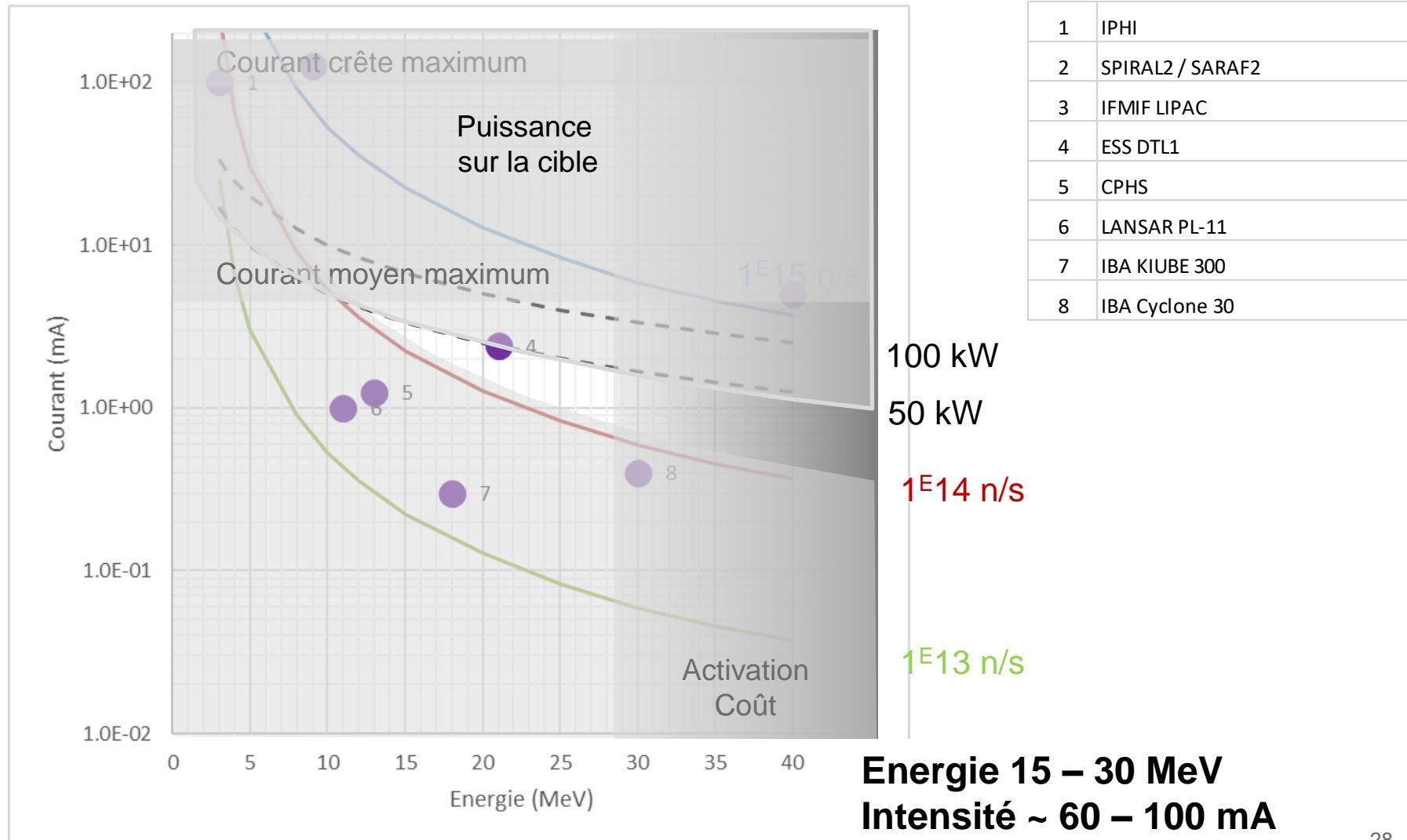
Ces activités nous permettent d'augmenter notre TRL sur les accélérateurs d'ions légers à haute intensité en vue de la réalisation de la source compacte française SONATE

# MERCI



*1<sup>er</sup> projet d'accélérateur linéaire français ?*

## ACCÉLÉRATEUR POUR SONATE



# OÙ TROUVER DES NEUTRONS EN EUROPE ? (POUR LA DIFFUSION NEUTRONIQUE)

after 2030



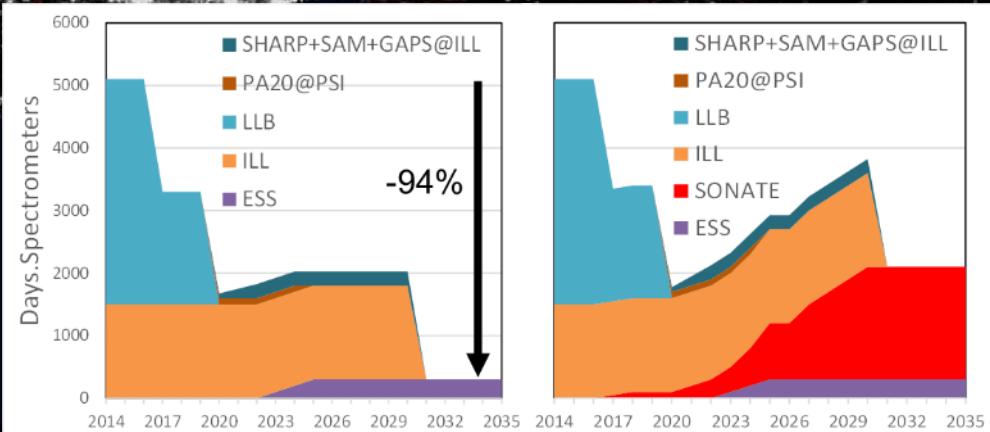
ESS

ISIS

*Fermeture Orphée 2019*

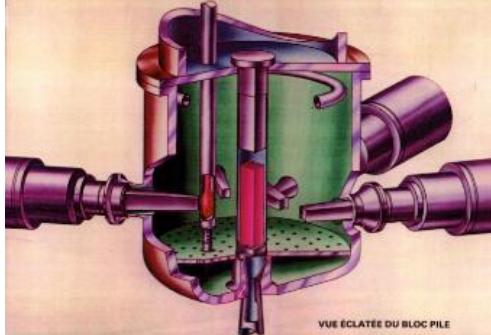
MLZ

SINQ



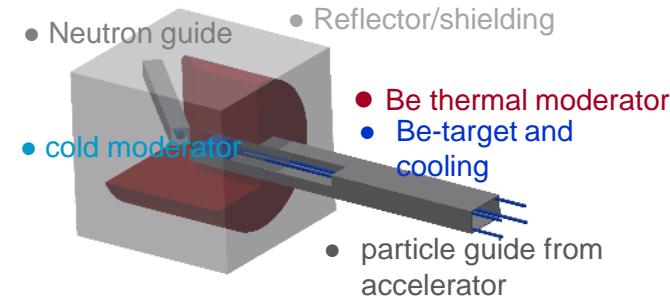
# AVANTAGES DES SOURCES COMPACTES

« Les utilisateurs veulent quelque chose d'aussi bien que ce qu'ils ont déjà »



## Orphée (continu)

Volume source (coeur)	$\sim 5 \cdot 10^4 \text{ cm}^3$
Volume de modération	$\sim 8 \cdot 10^5 \text{ cm}^3$
# neutrons	$\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ n.s}^{-1}$
Densité moyenne neutrons	$\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$



## Source compacte (pulsé)

Volume de la source (Be)	$\sim 2 \text{ cm}^3$
Volume de modération	$\sim 5 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$
# neutrons	$\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ n.s}^{-1}$
Densité moyenne neutrons	$\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$

(Flux crête)

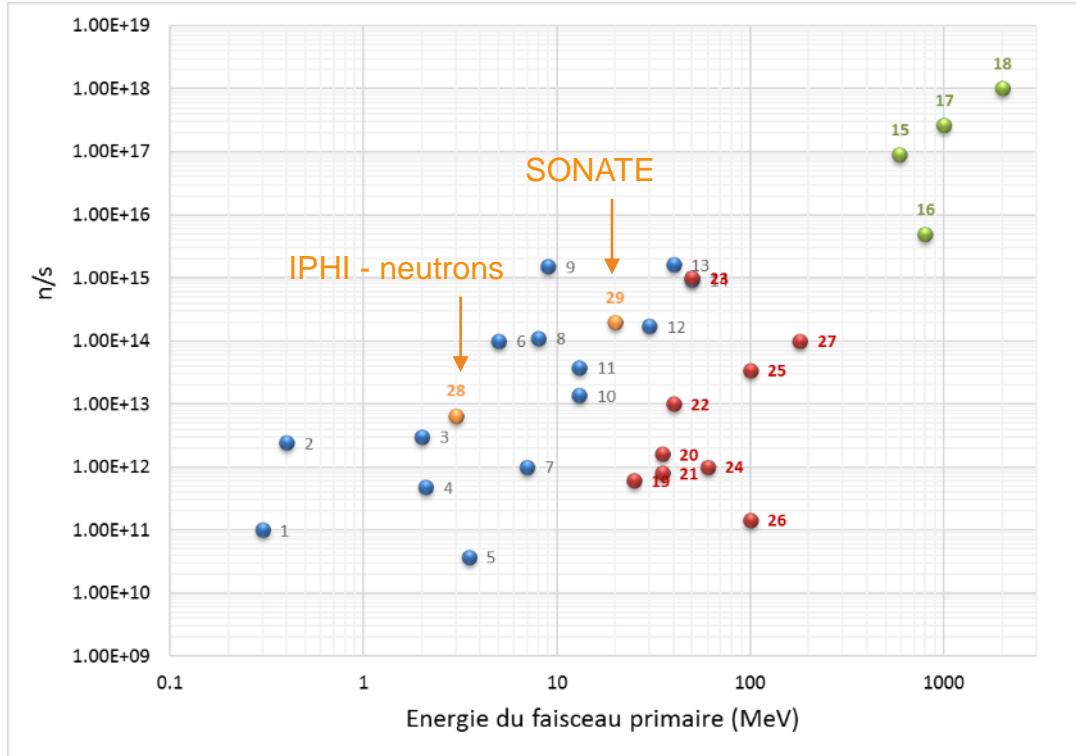
Coût de l'installation, coût de fonctionnement → baisse du « coût d'entrée » pour la diffusion neutronique → base d'utilisateurs pour ESS

Souplesse d'utilisation:

- Facilité d'accès
- Planification des expériences
- Instrumentation spécifique
- Formation

Offre neutronique  
complémentaire à ESS

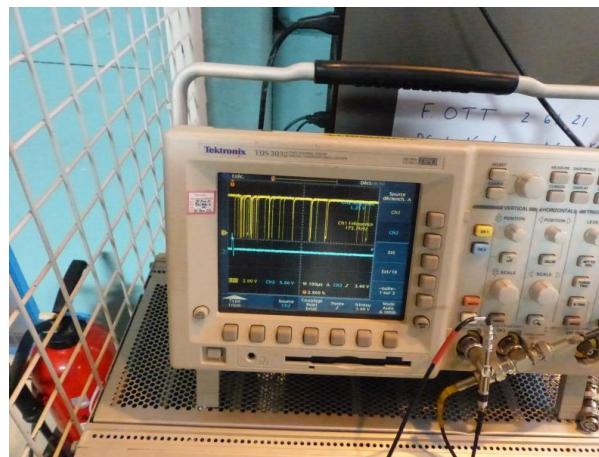
# SONATE: UN PROJET AMBITIEUX



Caveat: flux primaire de neutrons,  $\neq$  flux pour les utilisateurs

# 2016: PREMIERS TESTS SUR IPHI

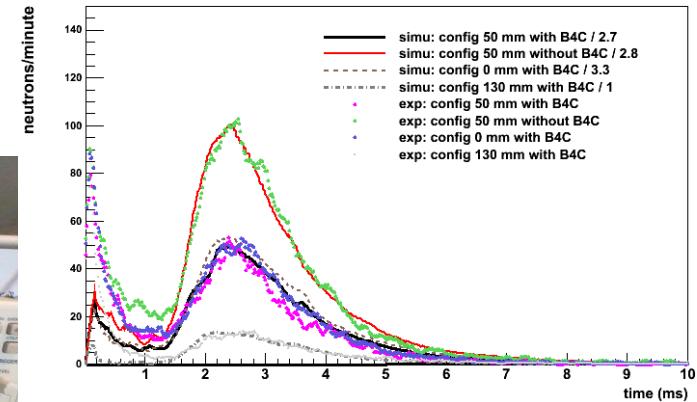
- Expérience Irfu – LLB, 13 juin - 6 juillet 2016
- Puissance faisceau = 10 W



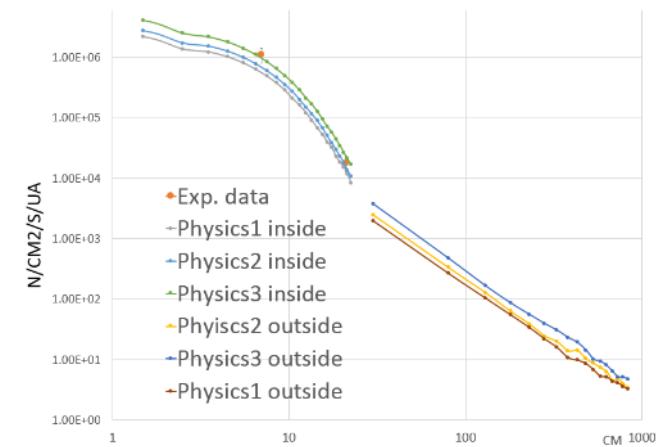
Bouffées de neutrons  
(pulses 100  $\mu$ s @ 1 Hz)



Cible Be + modérateur PE



Spectre en temps de vol



Mesures / simulations du  
flux de  $n$