

FROM RESEARCH TO INDUSTRY

cea

# 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

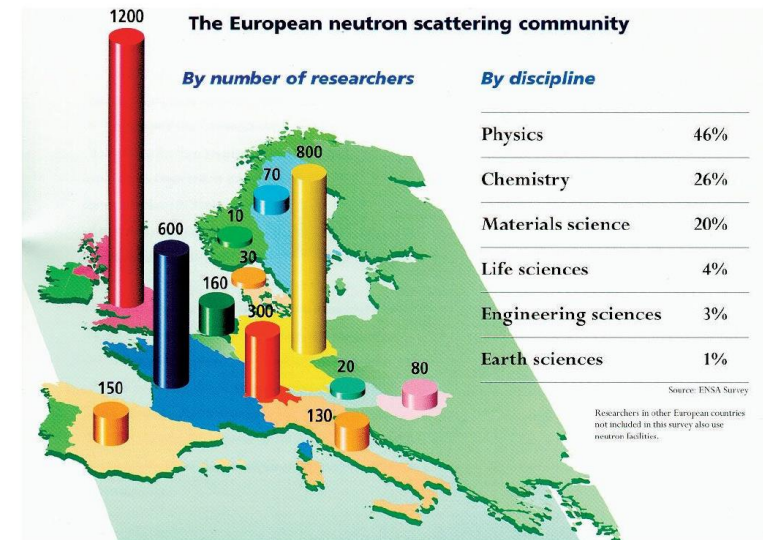
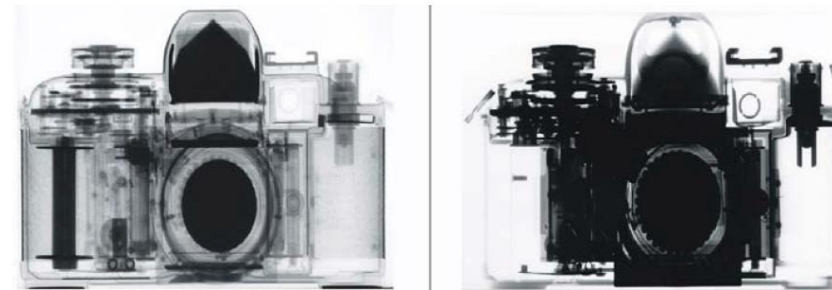


FIG. 9.1. Distribution of neutron users across European States and scientific disciplines (courtesy of the European Spallation Source Council).



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 (qqes 10 M€ - qqes 100 M€)

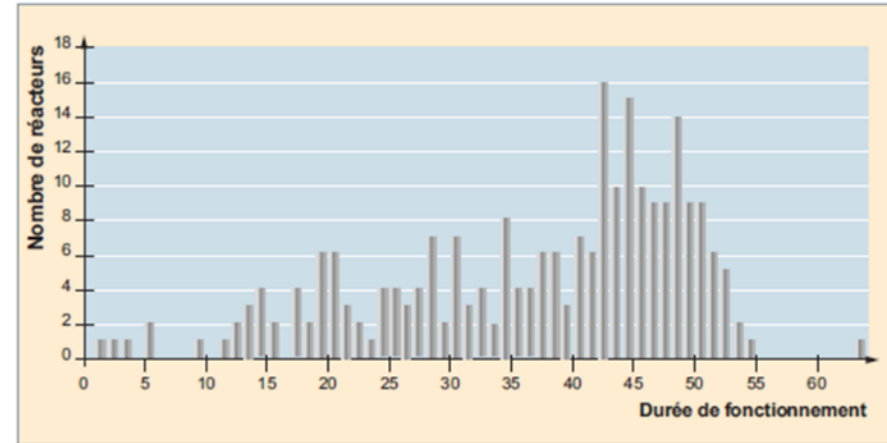
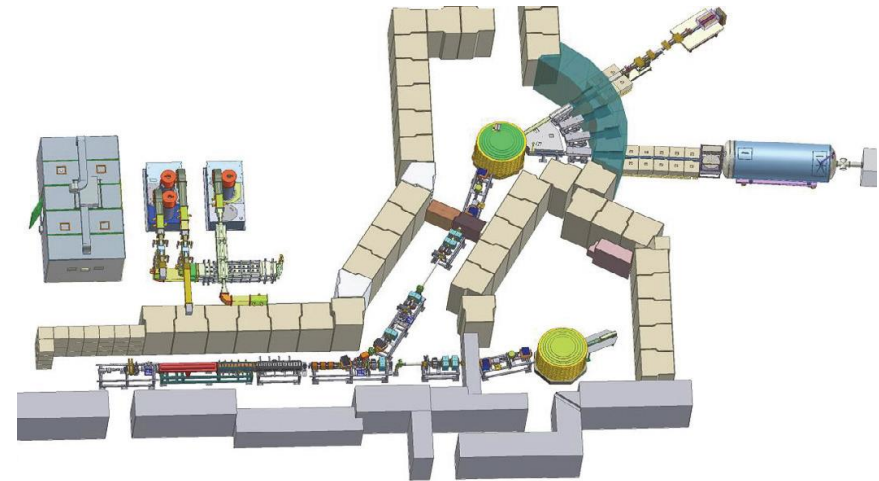


Fig. 135. Âge des réacteurs expérimentaux en service dans le monde.



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

<http://www.indiana.edu/~lens/publications.html>

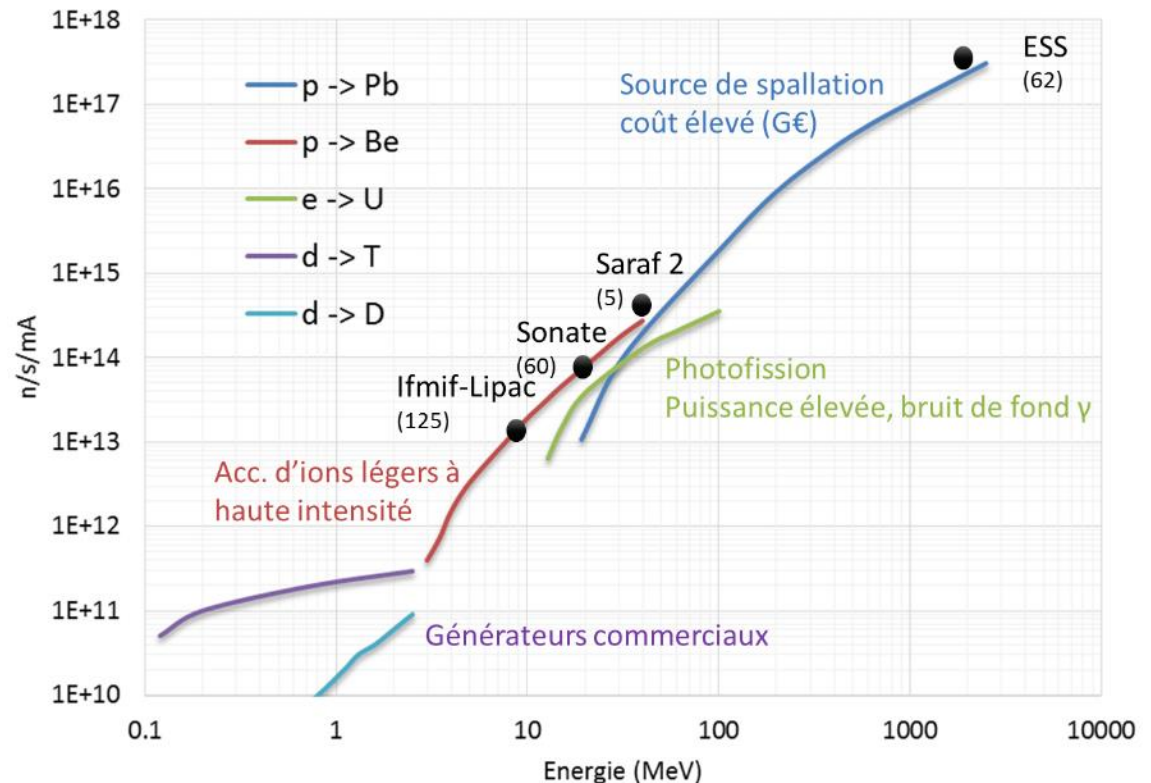
(1) [Research reactor database](#), AIEA, Janvier 2017

# LES SOURCES COMPACTES DE NEUTRONS (CANS)

Accélérateurs de **protons**  
ou **deutons**

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

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



Deux exemples dans cet exposé:

*Flux primaire de neutrons par mA  
en fonction de l'énergie*

## 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

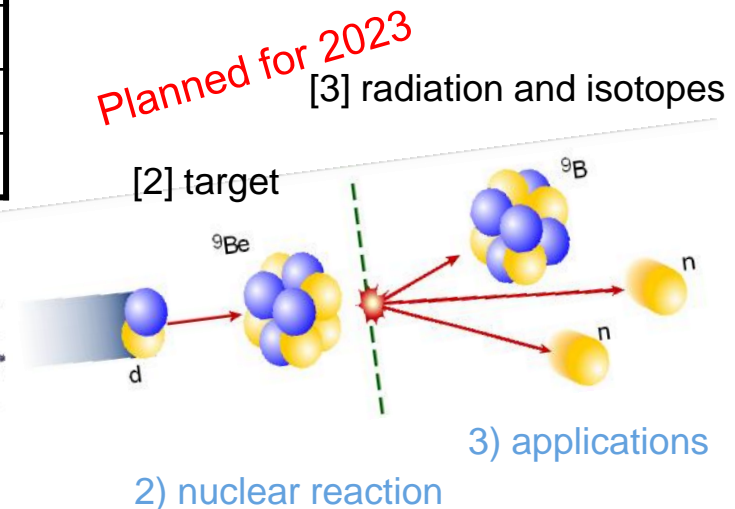
## The Soreq Applied Research Accelerator Facility

- ❖ 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

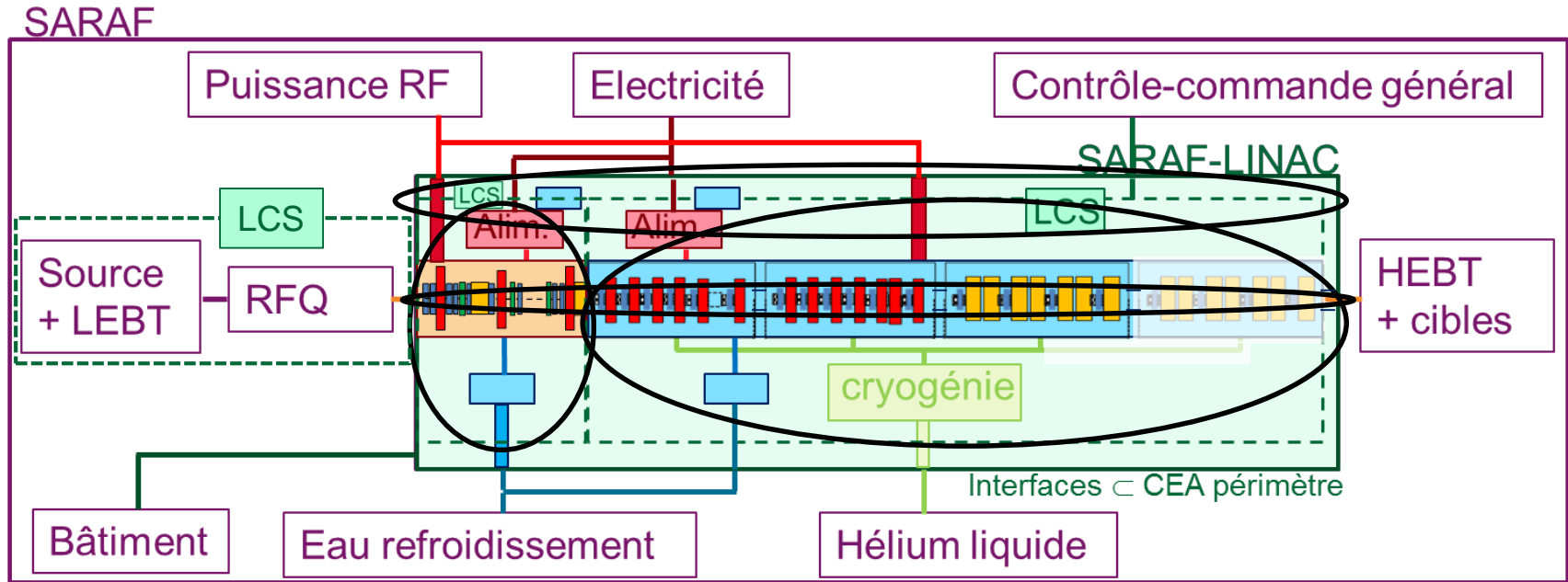
Parameter	Value	Comment
Ion Species	Protons/Deuterons	$M/q \leq 2$
Energy Range	5 – 40 MeV	Variable energy
Current Range	0.04 – 5 mA	CW (and pulsed)
Maintenance	Hands-On	Very low beam loss



1) fast particles

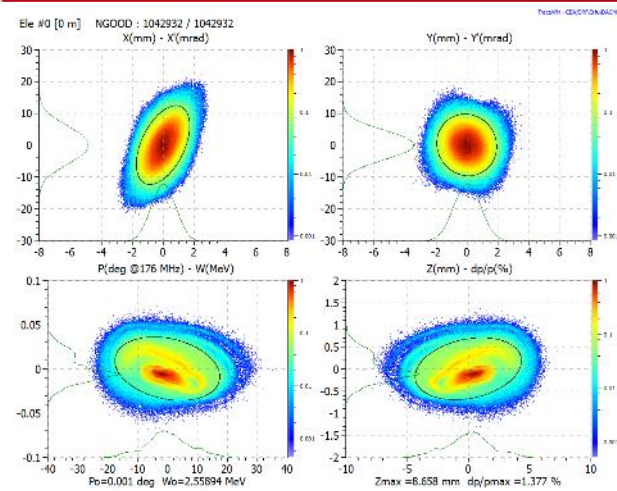




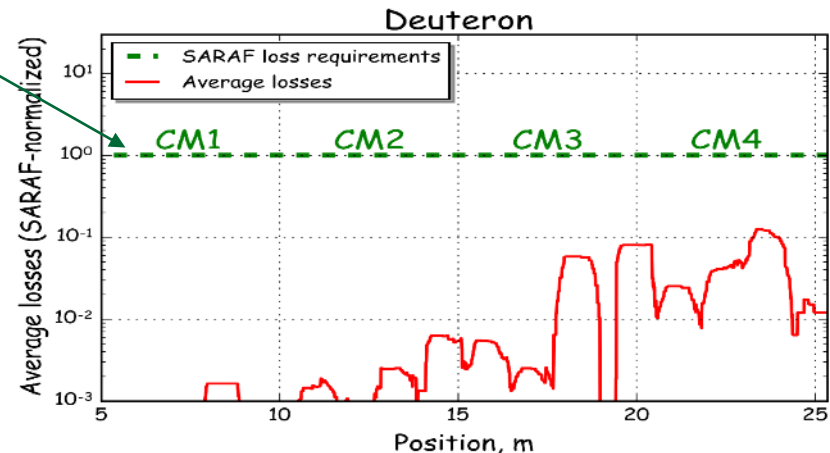
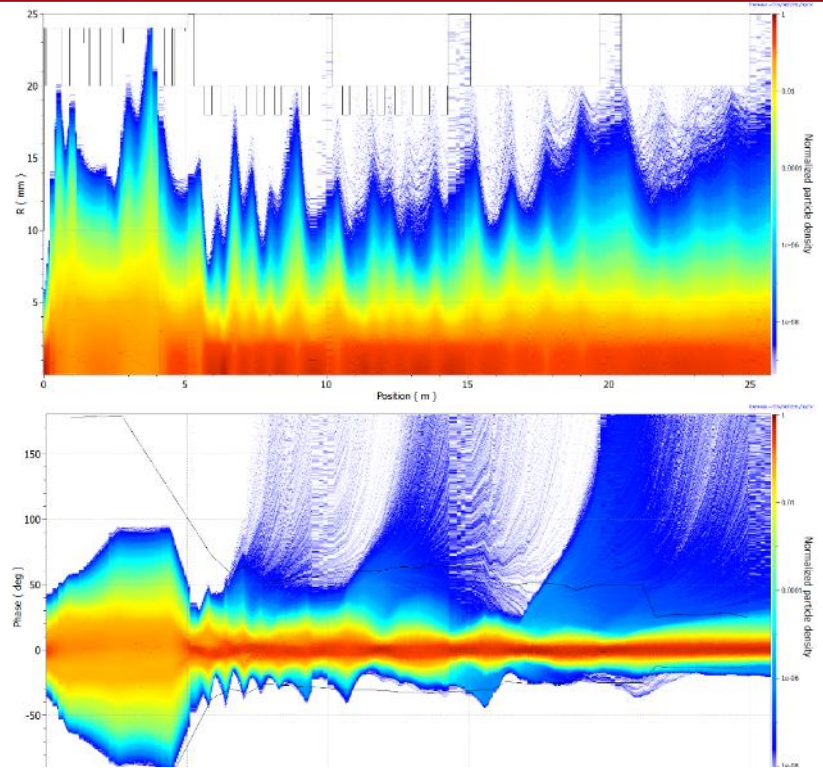
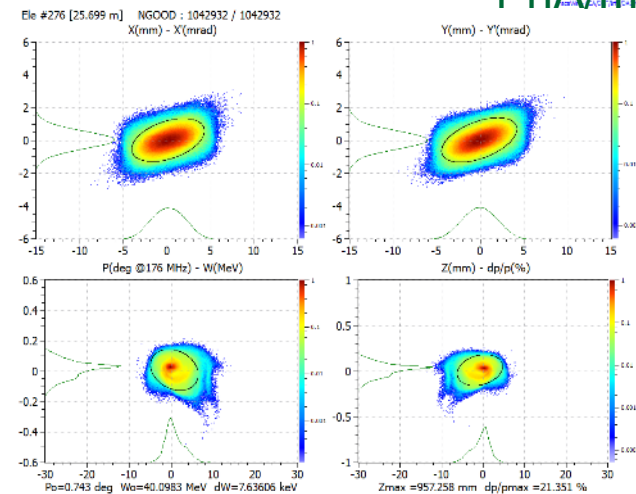


SARAF-LINAC est un composant de SARAF, constitué de 4 sous-systèmes :

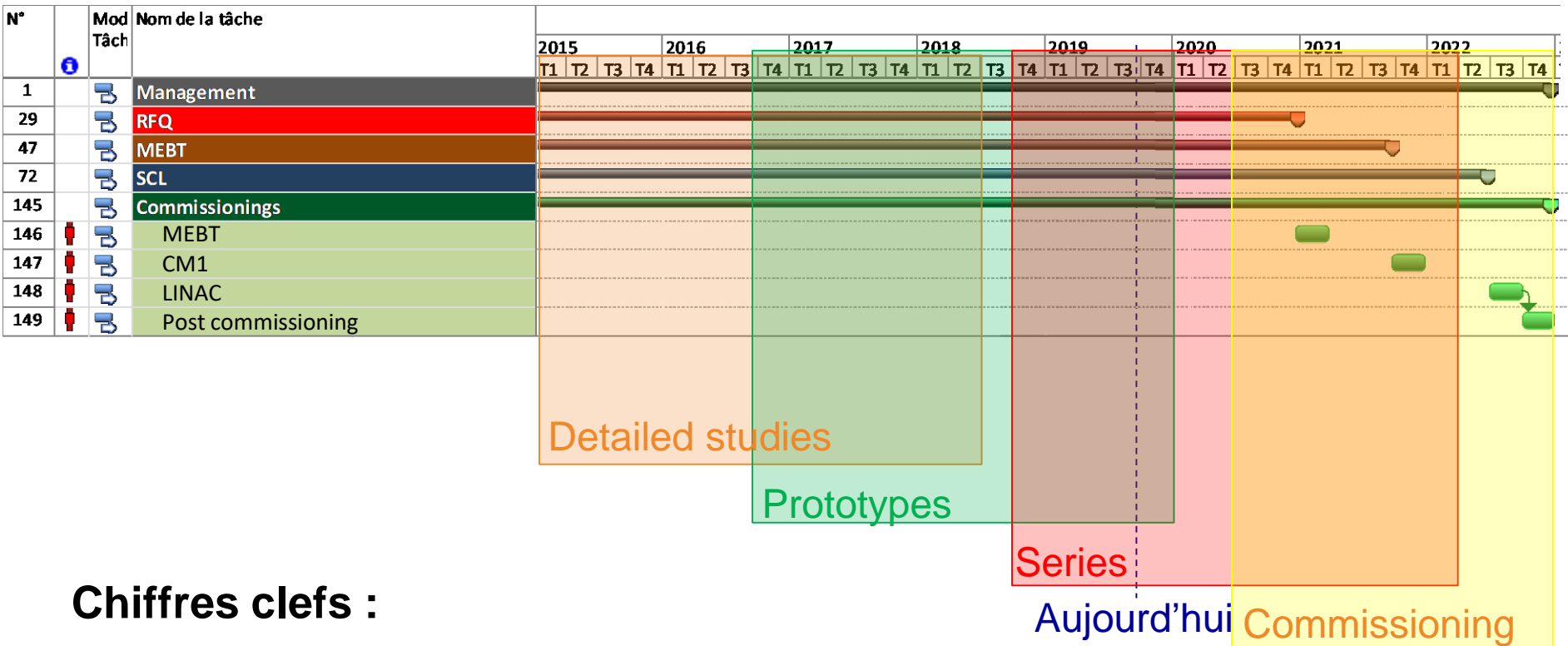
- La ligne moyenne énergie (MBT)
- L'accélérateur supra conducteur (SCL)
- Les diagnostics-faisceau (DIA)
- Le contrôle-commande (CCD)



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







## Chiffres clefs :

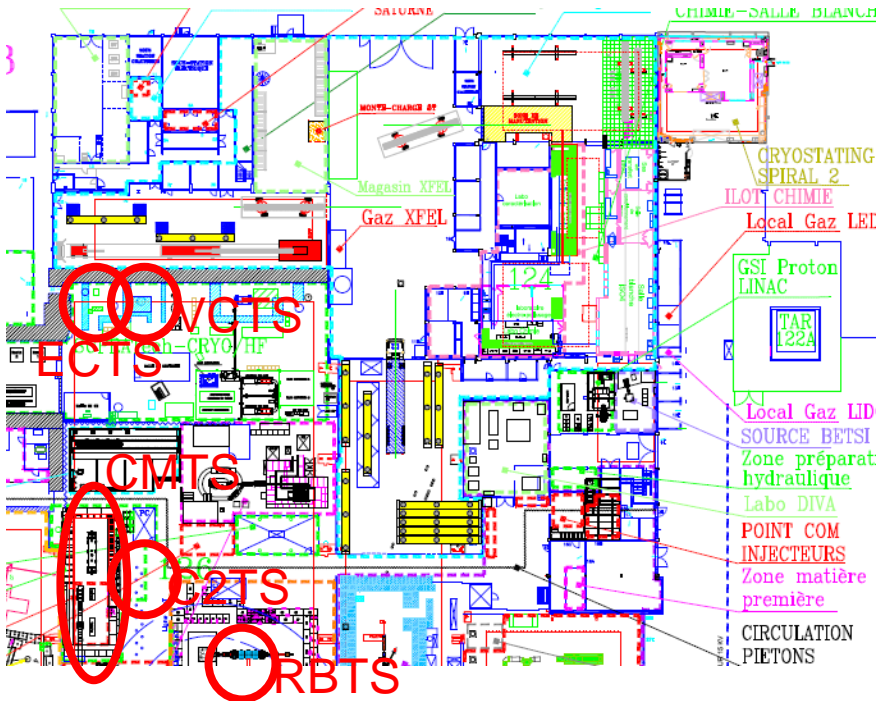
~ 8 ans

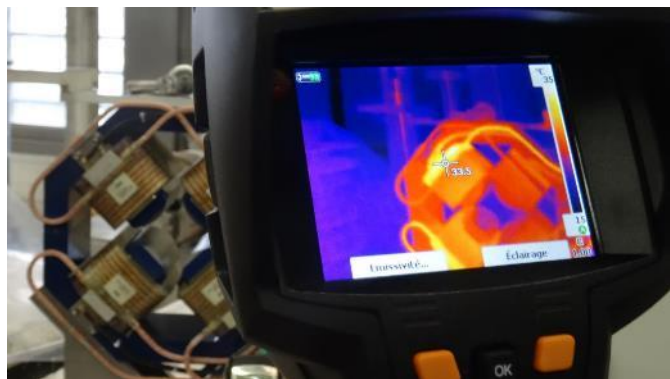
~ 160 h.an (~20 h.an/an)

[illegible]

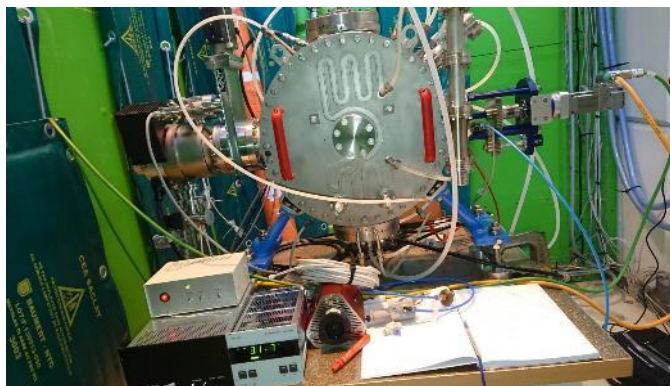
## Aujourd'hui

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





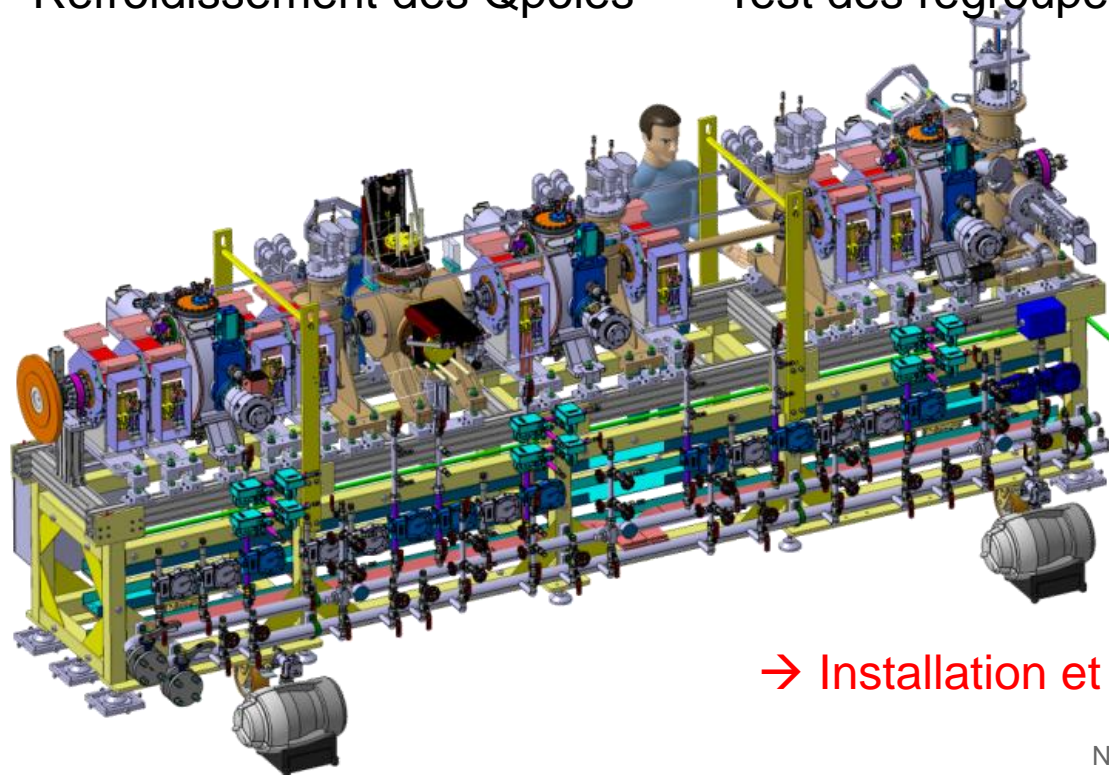
Refroidissement des Qpoles



Test des regroupeurs



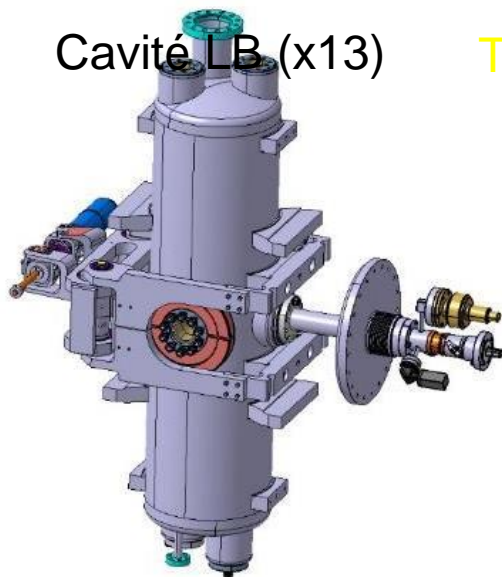
Regroupeurs



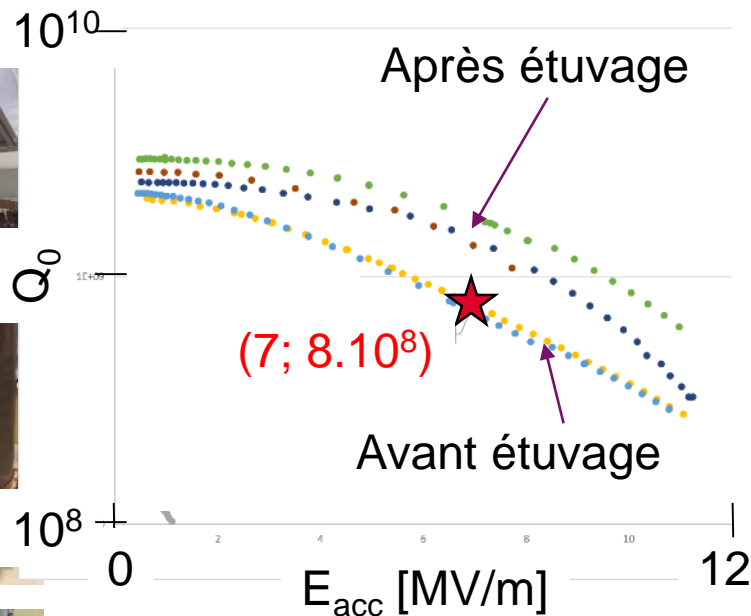
→ Installation et test METS S1-2020



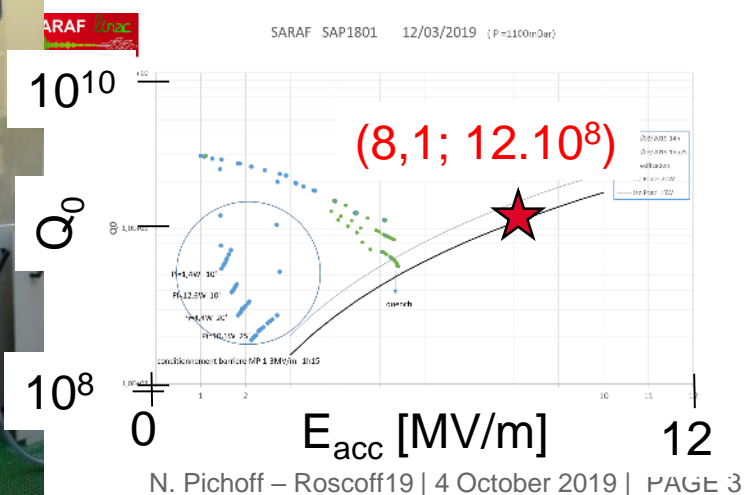
Cavité LB (x13)



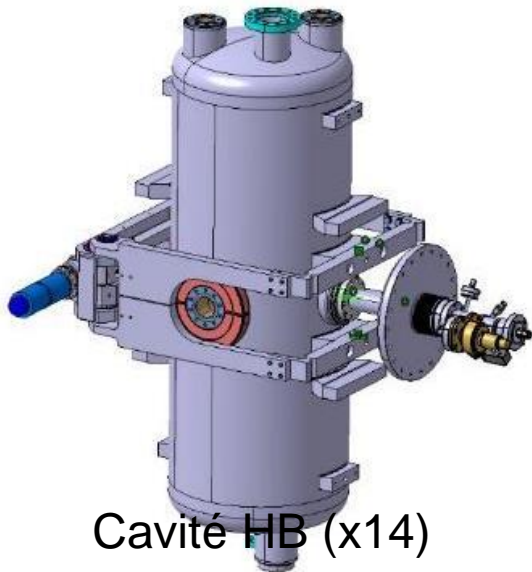
Test en ECTS



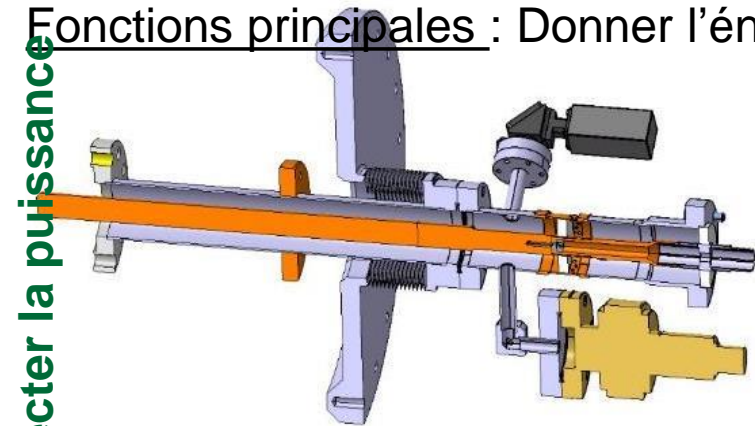
Préparation-Chimie



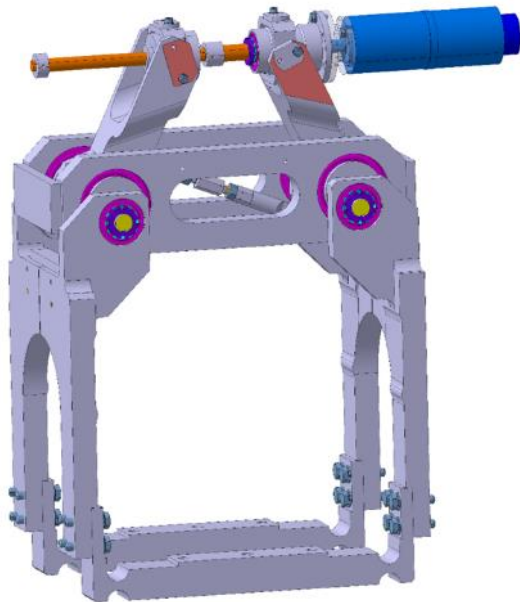
Cavité HB (x14)



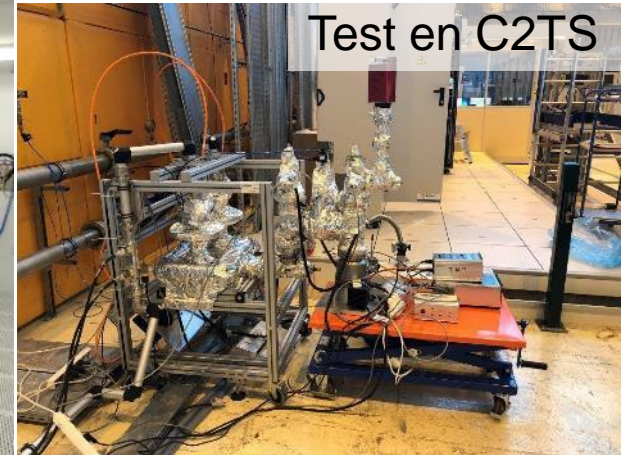
Fonctions principales : Donner l'énergie cinétique  
Montage SB



Ajuster la fréquence



Prêt à utilisation



Test en C2TS



Test en ECTS

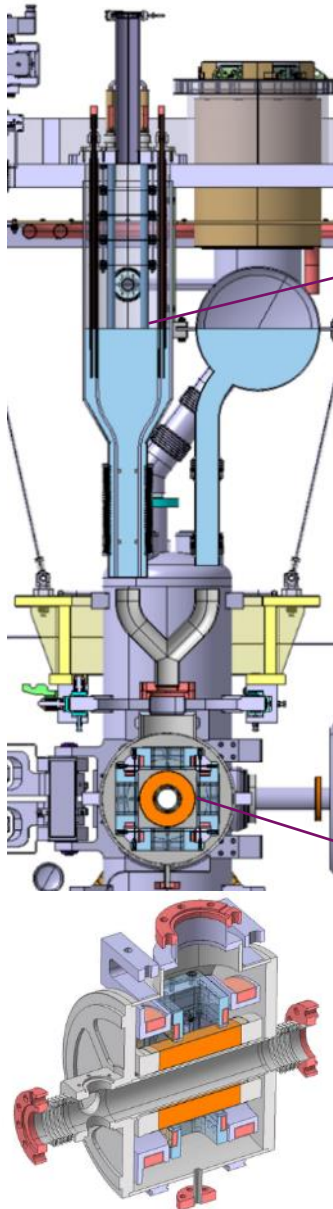
→ Lancement fabrication série



# SOLENOID PACKAGES

Contenir la taille transverse du faisceau

Amenée de courant (ADI)



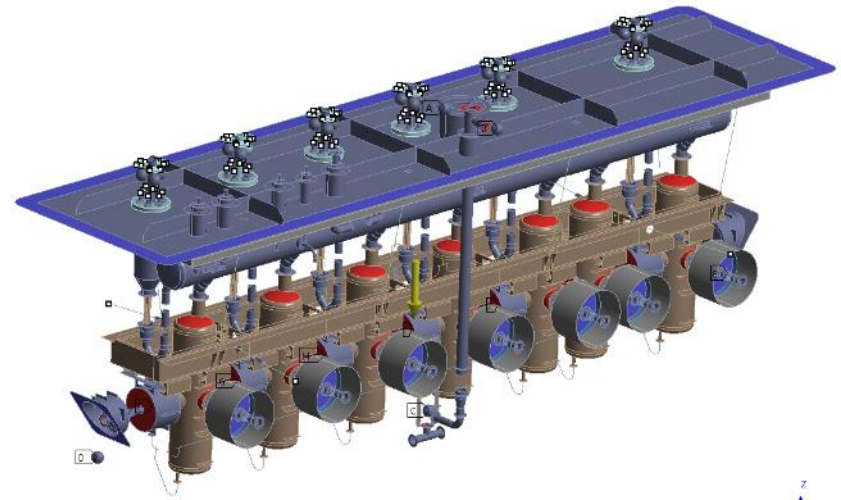
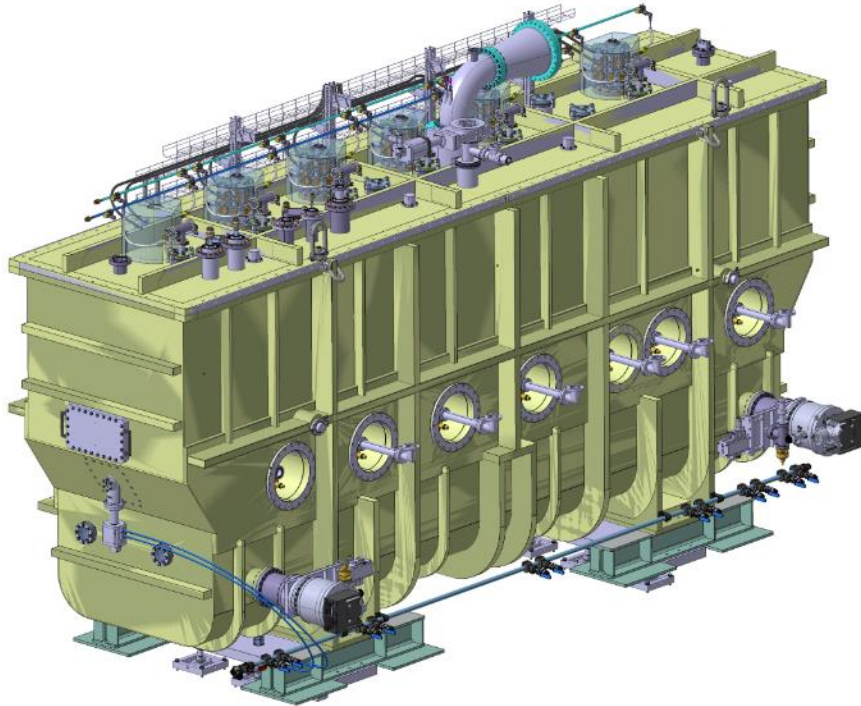
Solenoid package



Prêts pour le SPTS

→ Lancement fabrication série

→ 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 Boîtes 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)

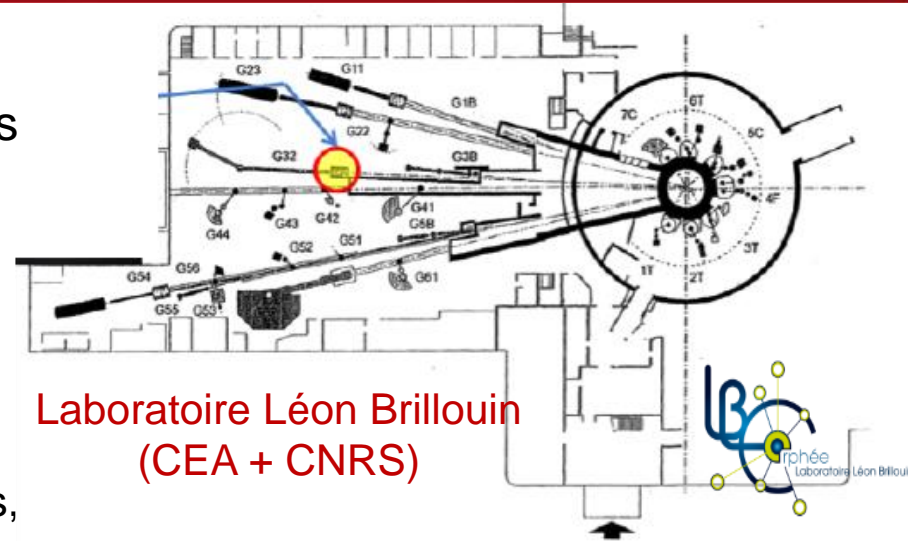


Source cOmpacte de Neutrons s'Appuyant  
sur la Technologie des accéléraTEurs



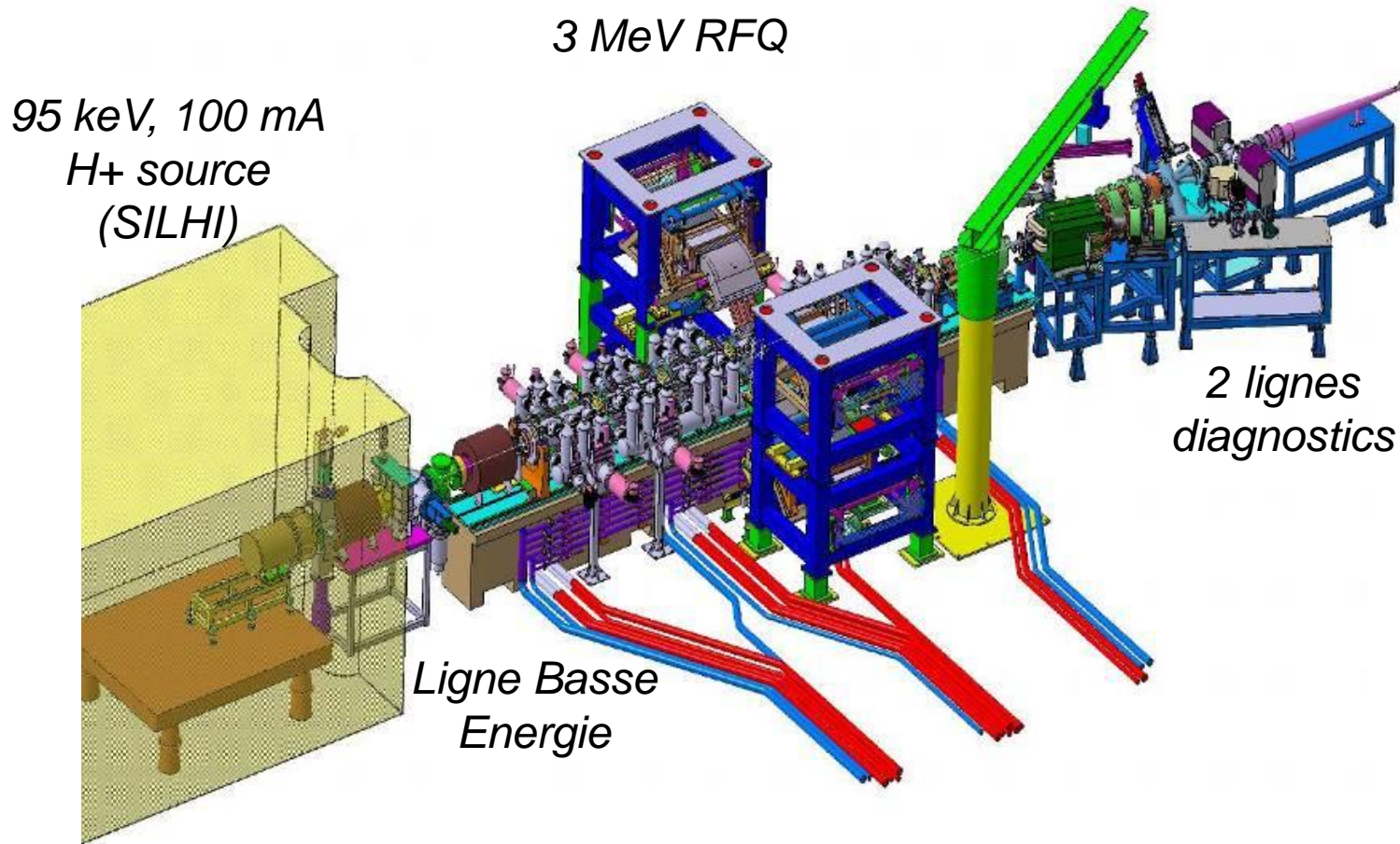
Groupe de travail commun IRFU – LLB depuis 2014:

- 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...)



*Implantation de protons → cloques de Be vaporisées par le faisceau à LENS (quelques kW)*





- 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

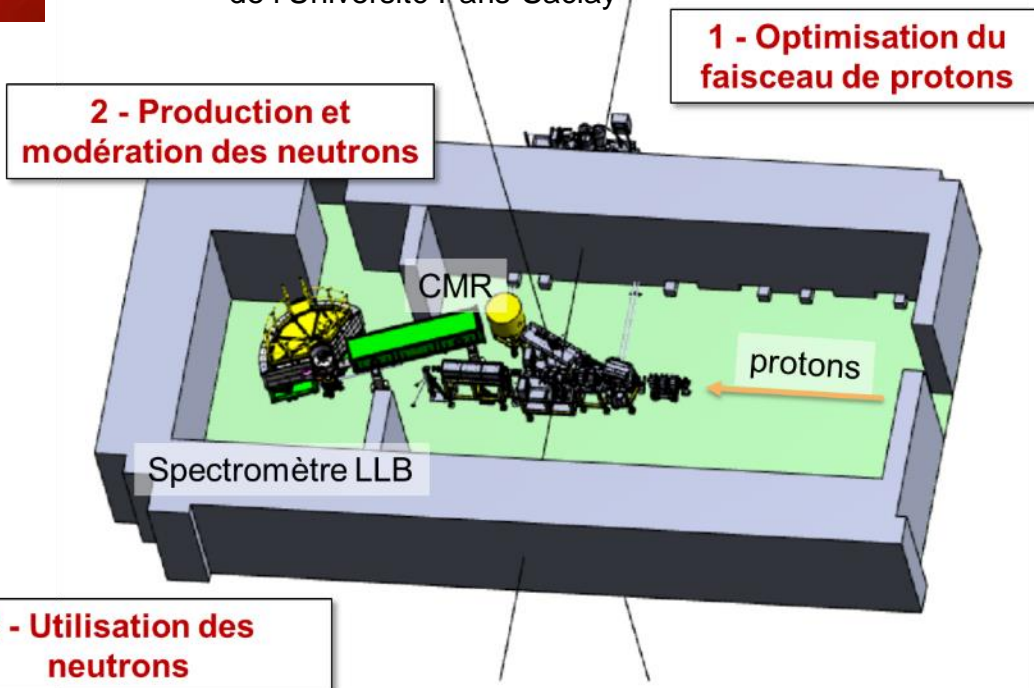
## SONATE

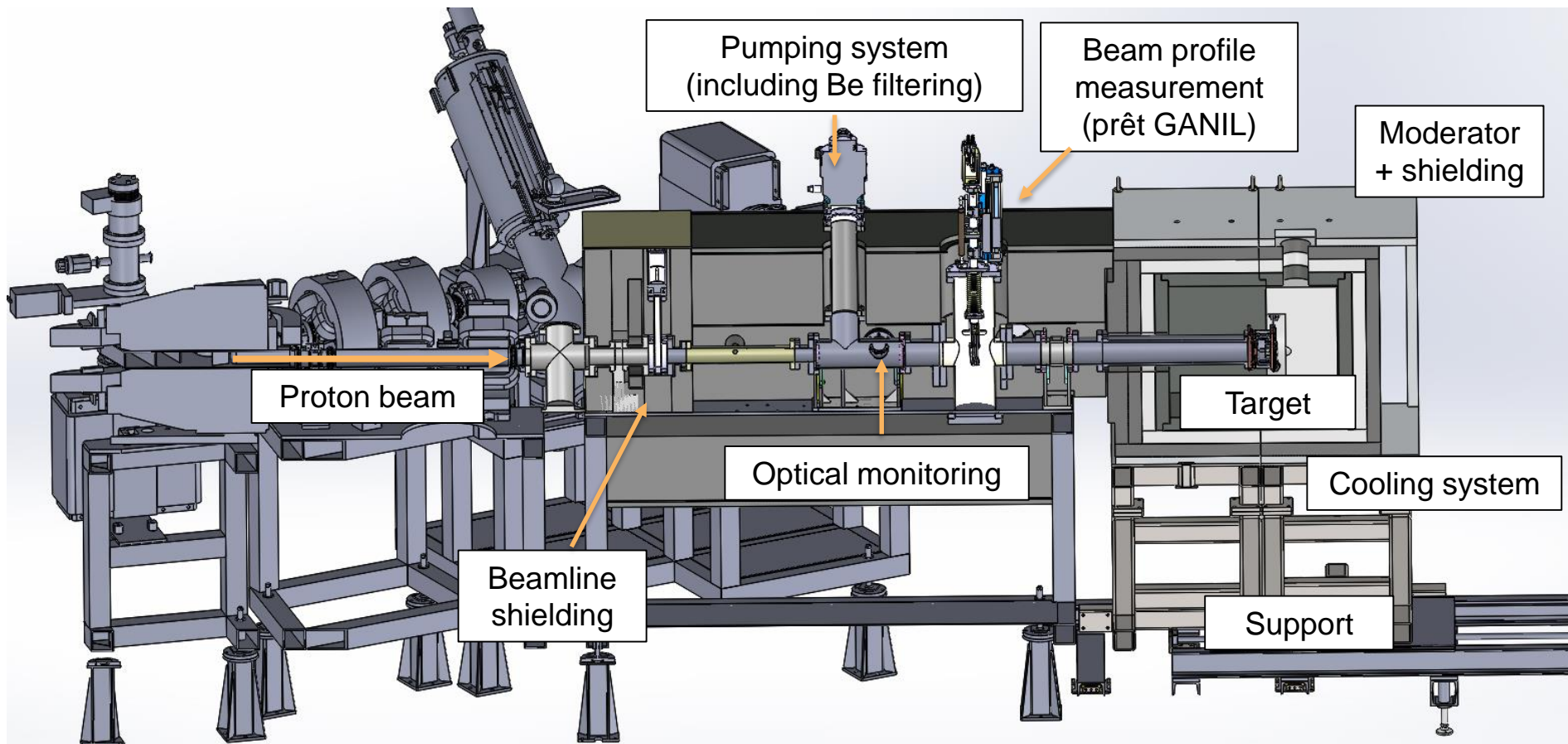
Installation dédiée  
2 cibles



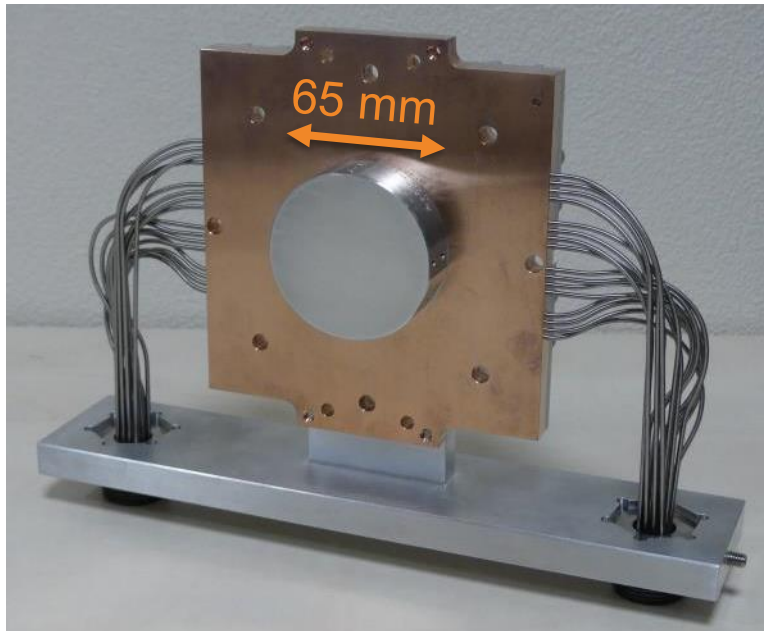
avec le soutien de P2I, PhOM et  
de l'Université Paris-Saclay

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









*Target screwed on the cooling plate*

Densité de puissance max  $0.5 \text{ kW} / \text{cm}^2$

Cible épaisse (2 cm)

→ Fonctionnement à  $500 \text{ }^\circ\text{C}$

→ Améliorer la diffusion de l'hydrogène

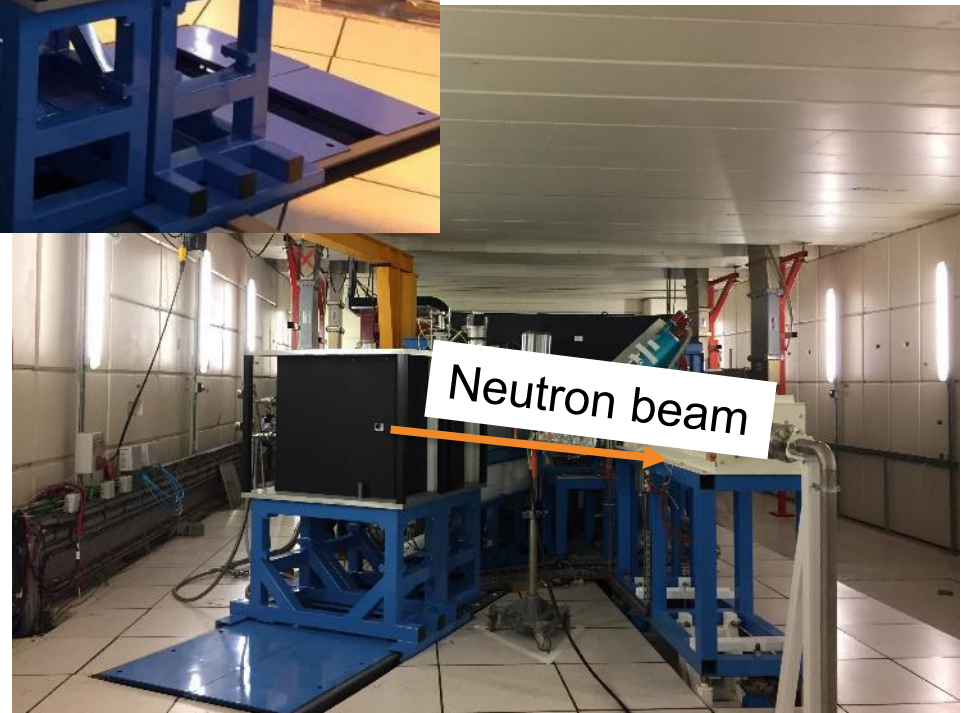


*Target + collimator + water cooling +  $T$  measurement*



*Target inside  $\frac{1}{2}$  shielding*

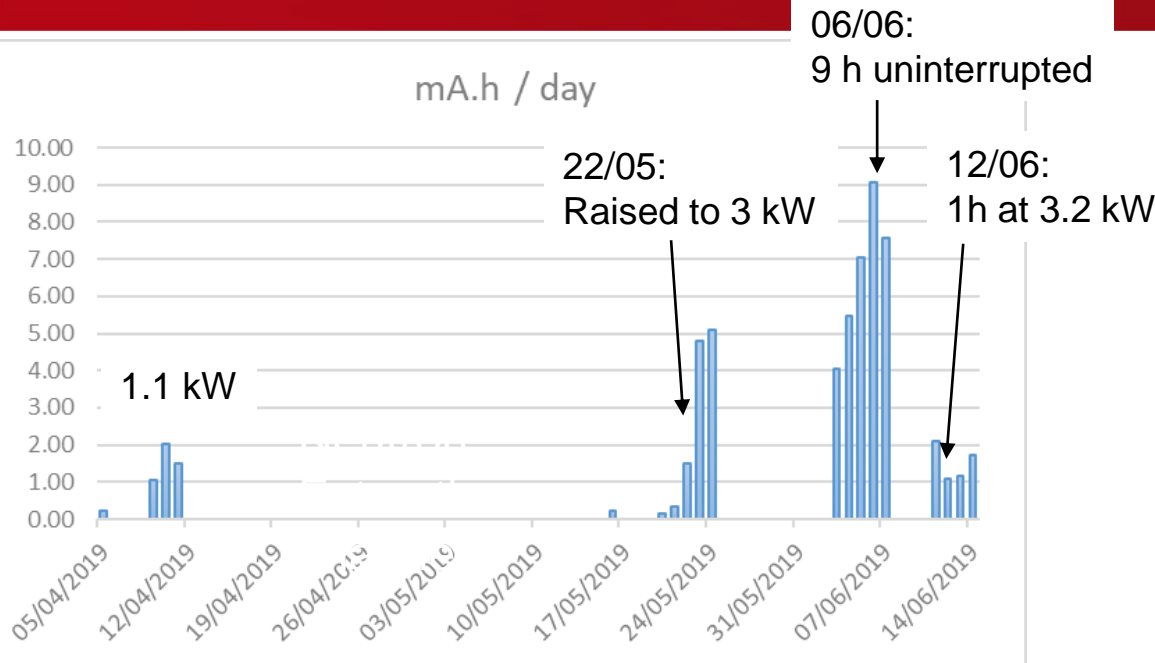
Proton beam



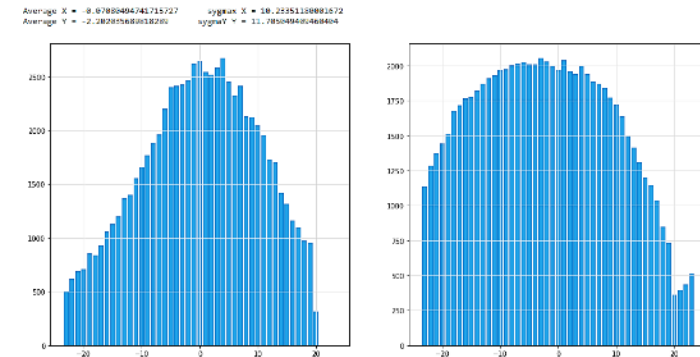
Neutron beam



# RÉSULTATS TESTS À 3 KW

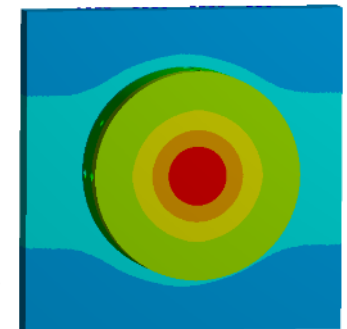
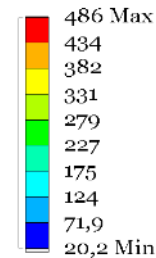


## Mesure du profil faisceau



- 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,  $1.7^{E20}$  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
- $P_{peak}^{max} \sim 8 \text{ kW/cm}^2$ ,  $\langle P \rangle^{max} \sim 400 \text{ W / cm}^2$  (~ 650 W/cm<sup>2</sup>)
- Thermocouples 5 mm de la surface ~ 200 °C
- Température moyenne en surface ~ 490 °C,  $\Delta T \pm 100$  °C

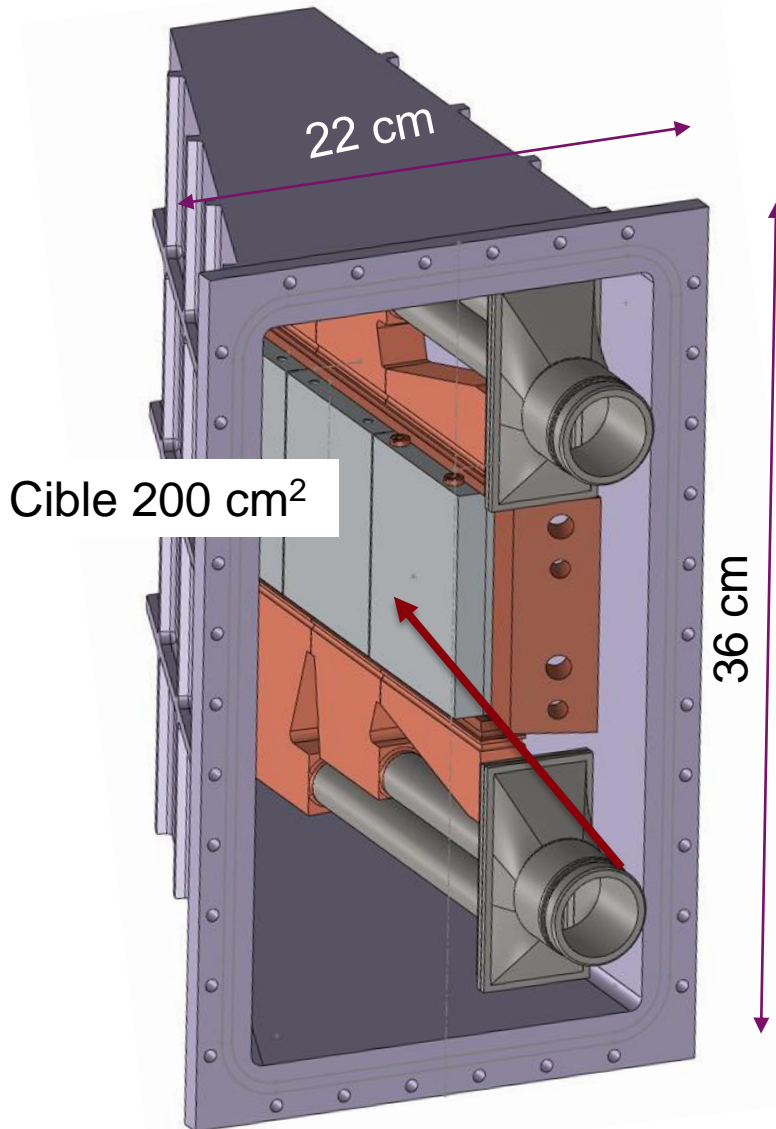
Type: Température  
Unité: °C  
Temps: 1



Cooling water <35°C

- Arrêt pour conditionnement IPHI mais cible toujours opérationnelle

Simulation thermique



## 1<sup>ère</sup> étape:

- Taille faisceau x 1.7
- Cible inclinée à 20°

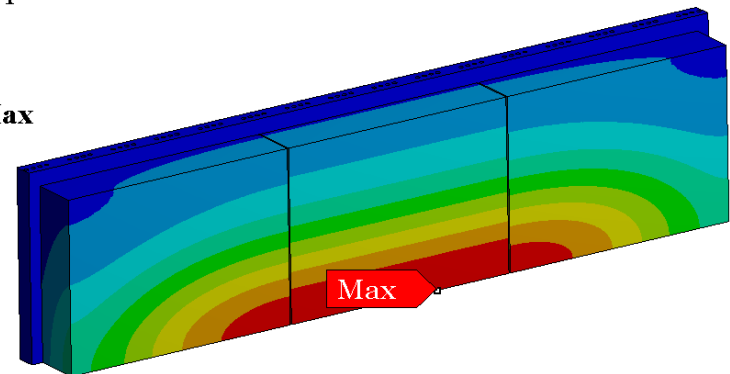
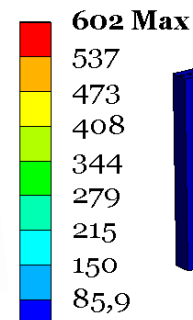
→ 30 kW

## 2<sup>e</sup> étape:

- Balayage horizontal du faisceau

→ 50 kW

Type: Temperature  
Unit: °C  
Time: 1



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

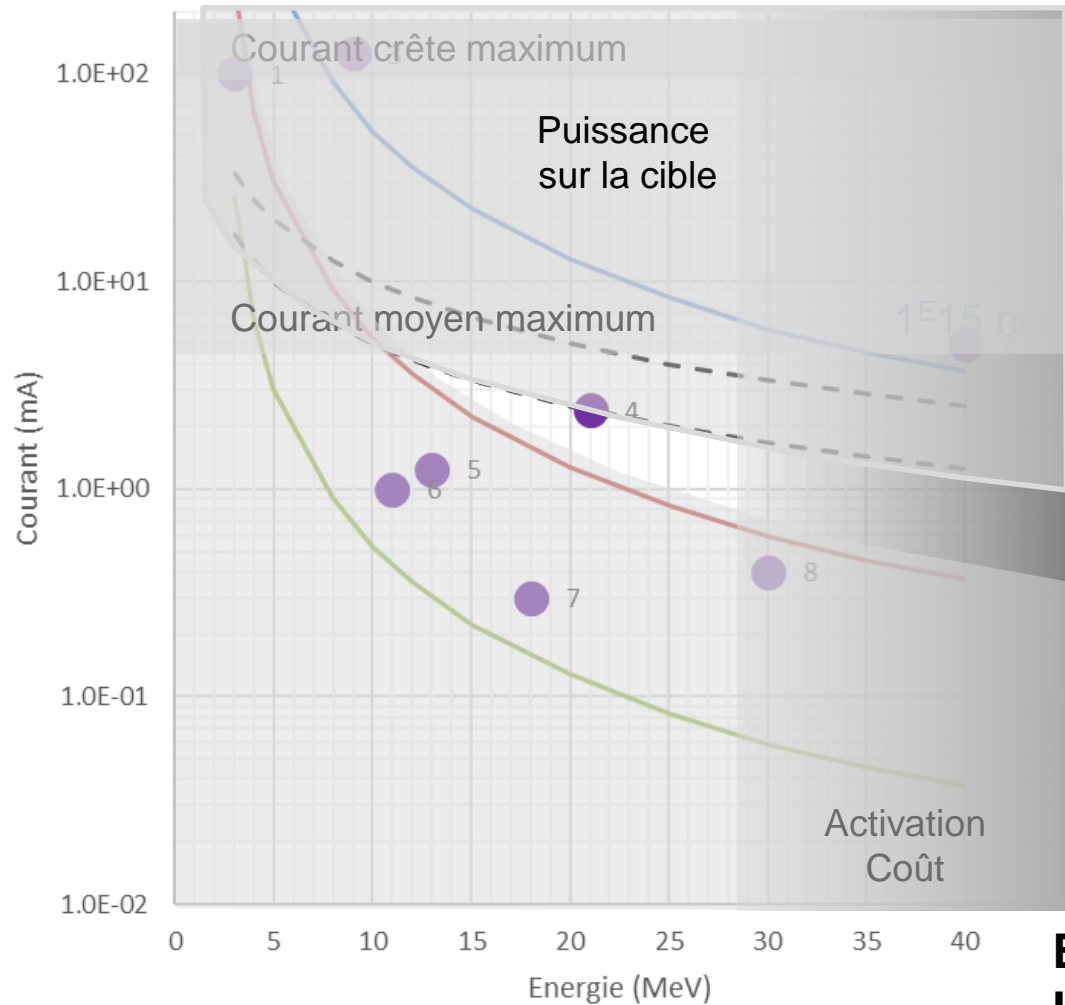
Ces activités nous permettent d'augmenter notre TRL sur les accélérateurs d'ions légers à haute intensité en vue de la réalisation de la source compacte française SONATE

MERCI



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

# ACCÉLÉRATEUR POUR SONATE



1	IPHI
2	SPIRAL2 / SARAF2
3	IFMIF LIPAC
4	ESS DTL1
5	CPHS
6	LANSAR PL-11
7	IBA KIUBE 300
8	IBA Cyclone 30

100 kW

50 kW

1E14 n/s

1E13 n/s

**Energie 15 – 30 MeV**  
**Intensité ~ 60 – 100 mA**



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

after 2030



ESS



ISIS

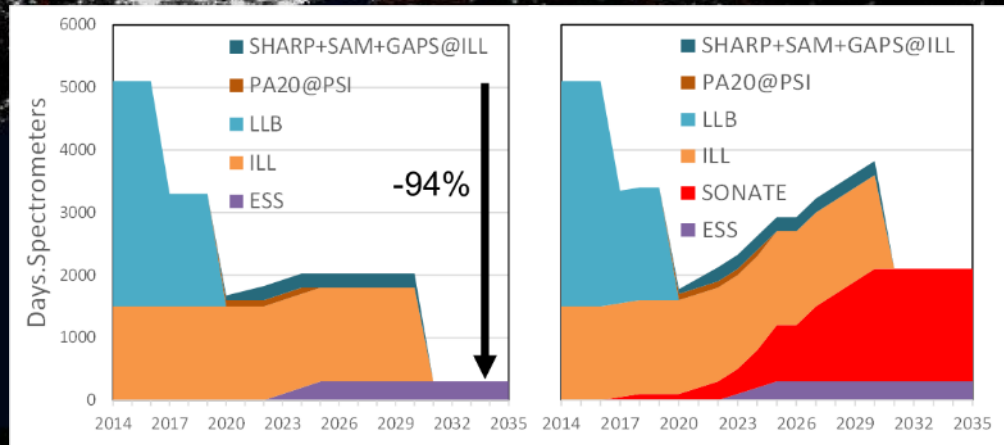
Fermeture Orphée 2019



MLZ

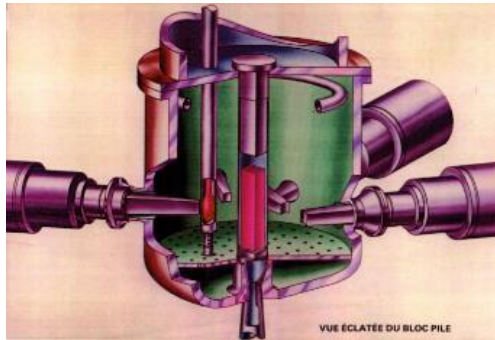


SINO



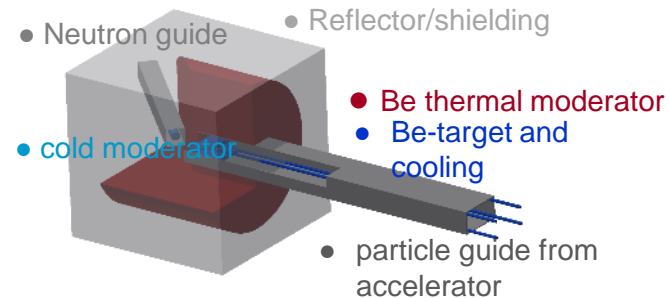
# AVANTAGES DES SOURCES COMPACTES

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



## **Orphée (continu)**

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



## **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	$\sim 5 \cdot 10^{15} \text{ n.s}^{-1}$ (Flux crête)
Densité moyenne neutrons	$\sim 1 \cdot 10^{12} \text{ n.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$

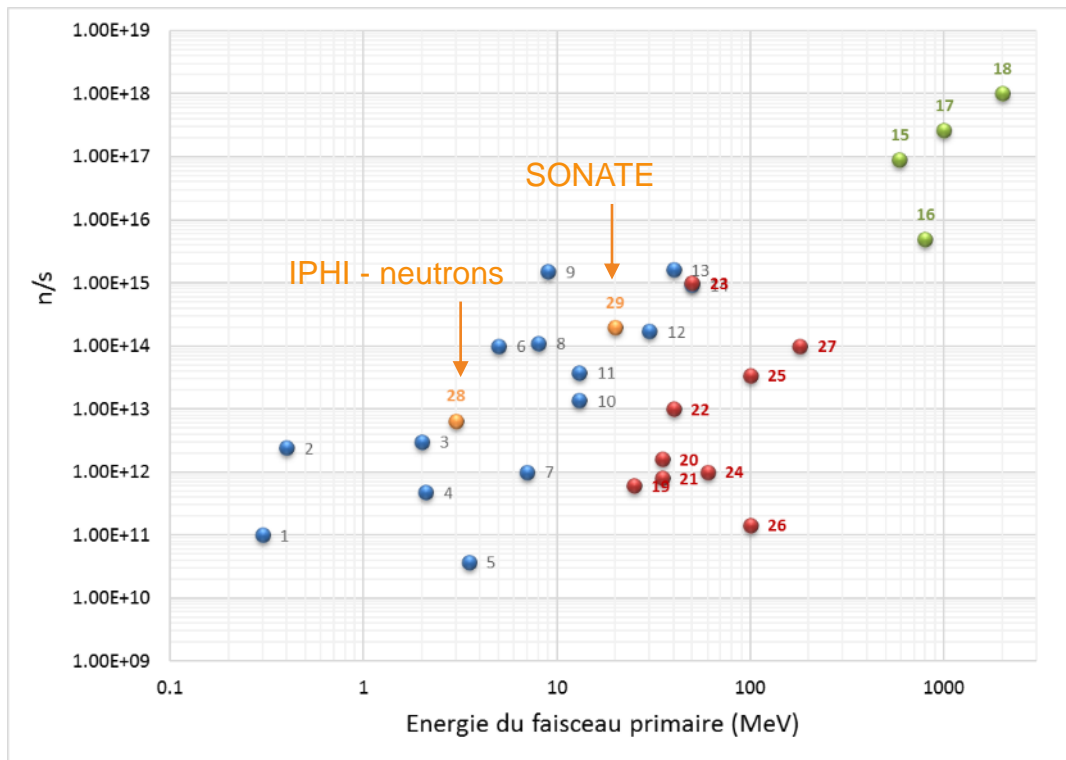
Coût de l'installation, coût de fonctionnement → baisse du « coût d'entrée » pour la diffusion neutronique → base d'utilisateurs pour ESS

Souplesse d'utilisation:

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

**Offre neutronique  
complémentaire à ESS**

# SONATE: UN PROJET AMBITIEUX



- 1 FNG
- 2 HINEG2
- 3 PKUNIFTY
- 4 Franz
- 5 KUANS
- 6 Legnaro
- 7 RANS
- 8 iBNCT
- 9 IFMIF-Lipac
- 10 LENS
- 11 CPHS
- 12 Kurri
- 13 SPIRAL 2 / SARAF 2
- 14 ESS Bilbao

- 19 Barriloché
- 20 HUNS
- 21 UTCANS
- 22 nELBE
- 23 Ariel
- 24 Gaertner Linear Accelerator
- 25 Gelina
- 26 Pohang
- 27 Orela
- 15 PSI (SINQ)
- 16 ISIS TS2
- 17 SNS
- 18 ESS

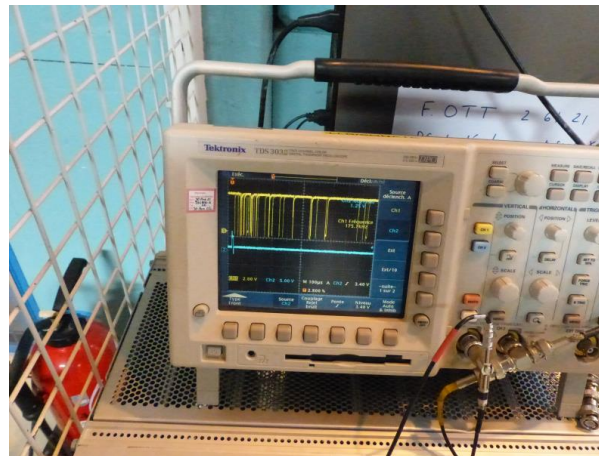
Caveat: flux primaire de neutrons, ≠ flux pour les utilisateurs



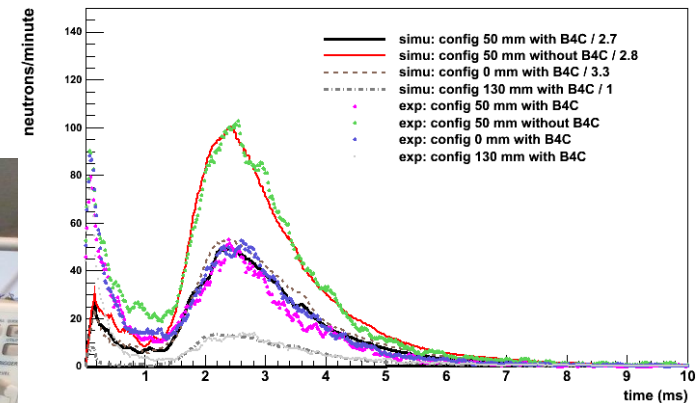
- Expérience Irfu – LLB, 13 juin - 6 juillet 2016
- Puissance faisceau = 10 W



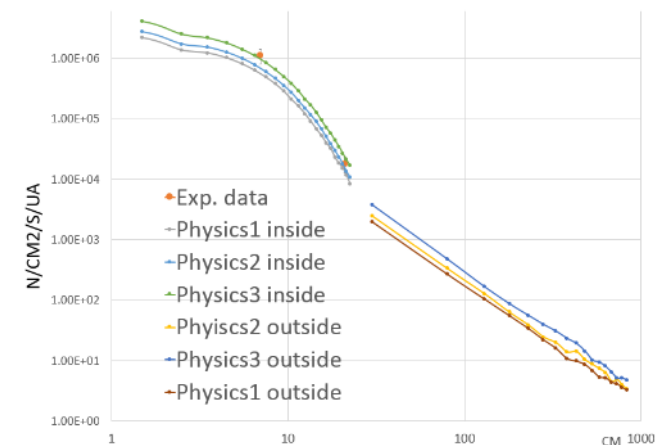
Cible Be + modérateur PE



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



Spectre en temps de vol



Mesures / simulations du  
flux de n