



Accélérateurs de production de neutrons





Pourquoi utiliser des neutrons ?

Méthodes analytiques

■ Diffusion neutronique

- Diffraction – Spectroscopie

■ Radiographie

- Radiographie industrielle
- Radiographie pour des sujets académiques

■ Analyse par activation neutronique

- En réacteur
- Sur site

■ Métrologie

- Calibration d'équipements de mesures
- Développements techniques

■ Physique nucléaire

- Mesures de sections efficaces
- Moment électrique dipolaire du neutron
- Temps de vie du neutron
- $n - \bar{n}$

■ Irradiations

- Matériaux
- Composants électroniques
- Silicium
- Organismes vivants

■ Production de radio-isotopes

- Médical: ^{99}Mo , ^{131}I , ^{177}Lu , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{90}Y ...
- Industrie: ^{192}Ir , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{252}Cf ...

■ Médecine

- BNCT
Boron Neutron Capture Therapy



Production des neutrons

Radioisotopes ($\alpha \rightarrow \text{Be}$): $\text{Po}(\alpha) \rightarrow \text{Be}$; AmBe ;

^{252}Ca 2×10^6 n/s/ μg (production ~ 250 mg/year $\rightarrow 5 \times 10^{11}$ n/s)



Fusion : D-D , D-T / $10^8 - 10^{10}$ n/s (~ 100 keV)



Réacteurs nucléaires : réaction en chaîne : $n - ^{235}\text{U}$
 $10^{17} - 10^{18}$ n/s



Réactions nucléaires : ion $\rightarrow$ cible
 $10^8 - 10^{18}$ n/s





Techniques utilisables sur des sources par accélérateur

Méthodes analytiques

- **Diffusion neutronique**
 - Diffraction – Spectroscopie
- **Radiographie**
 - Radiographie industrielle
 - Radiographie pour des sujets académiques
- **Analyse par activation neutronique**
 - En réacteur
 - Sur site
- **Métrologie**
 - Calibration d'équipements de mesures
 - Développements techniques
- **Physique nucléaire**
 - Mesures de sections efficaces
 - Moment électrique dipolaire du neutron
 - Temps de vie du neutron
 - n-nbar

■ Irradiations

- Matériaux
- Composants électroniques
- Silicium (dopage)
- Organismes vivants / Agriculture / Espace

■ Production de radio-isotopes

- Médical: ^{99}Mo , ^{131}I , ^{177}Lu , ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{90}Y ...
- Industrie: ^{192}Ir , ^{60}Co , ^{241}Am , ^{252}Cf ...

■ Médecine

- BNCT
Boron Neutron Capture Therapy



Les sources de neutrons (par accélérateurs)

- Spallation sources
 - ISIS – PSI – JPARC – SNS – LANSCE – CSNS – ESS (protons linacs)
- >1G€
 - GELINA (photofission 150 MeV)
 - IFMIF – DONES (d-40 MeV, 125 mA, 5 MW)
 - MYRRHA (« hybride », proton + réacteur)
- >100M€
 - NFS@SPIRAL2 (40MeV)
 - SARAF (Israel) (40MeV)
 - NEPIR INFN Legnaro
 - ICONE – HBS – ARGITU
- >1M€
 - GENESIS@LPSC (D-D, D-T)
 - SAPHIR@CEA (photofission)
 - AMANDE@IRSN (H ou D)
- Générateur D-D , D-T
 - Sources AmBe, Ca

NOTA

~ 220 research reactors in operation in the world

En France (39 depuis 1948)
2026 → 2 (+1 en 2033)
USA → 48 ; EU → 33
(AIEA database)



Non exhaustif !



Diffusion neutronique



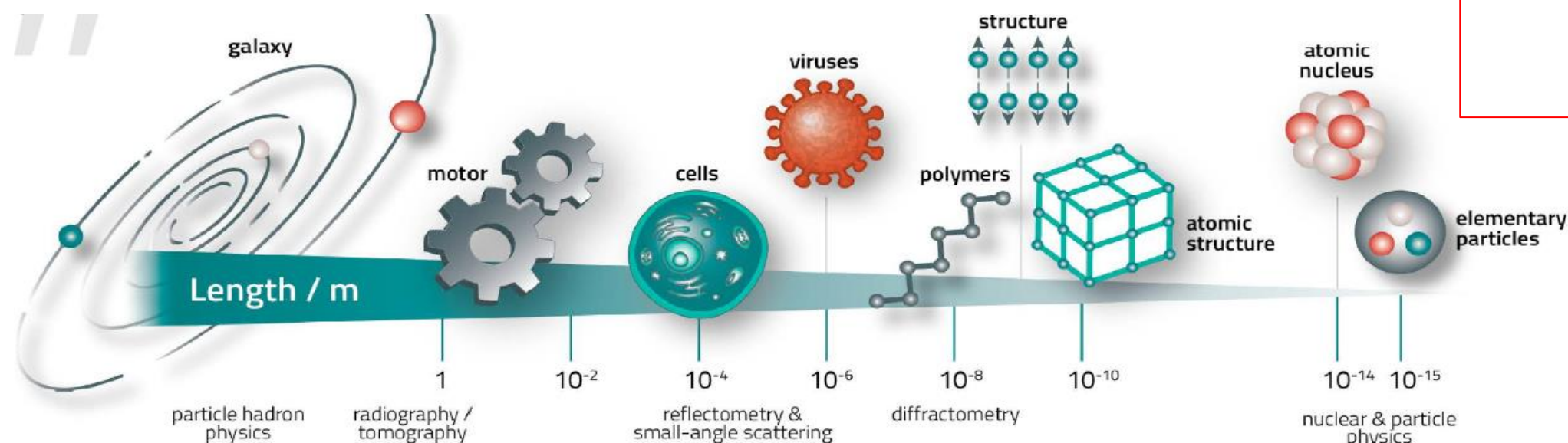
La diffusion neutronique

- Une panoplie de techniques d'étude des structures et des excitations dans la matière condensée

Nécessite des

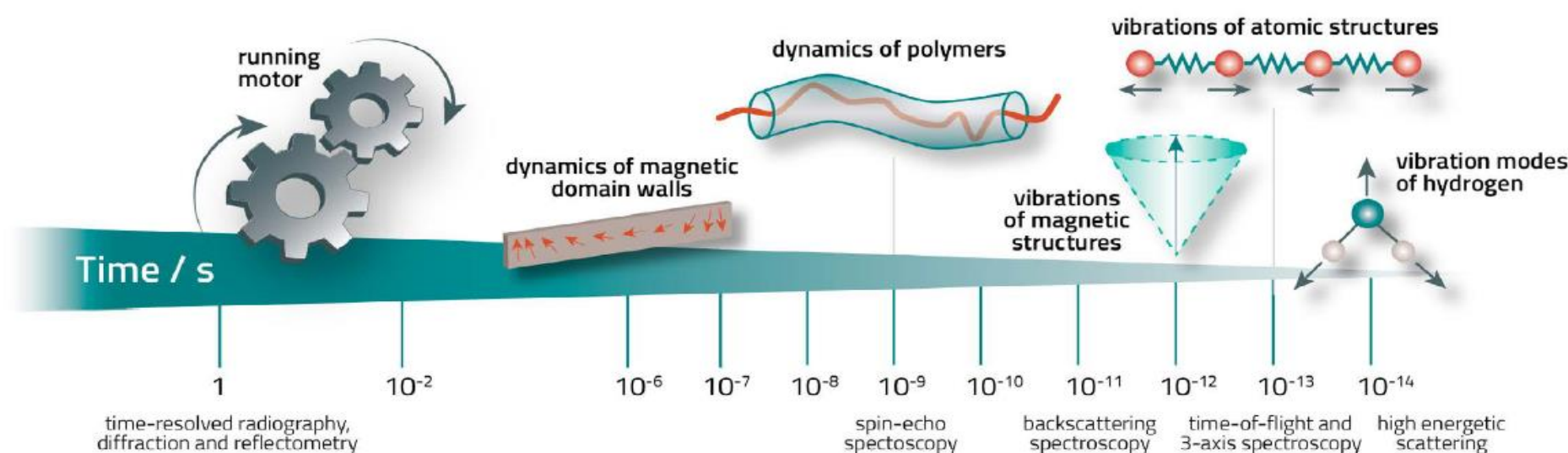
- Neutrons thermiques :
10 – 100 meV ($\lambda = 1 - 3\text{\AA}$)
- Neutrons froids :
0.2 – 10 meV ($\lambda = 3 - 20\text{\AA}$)

Structure



7

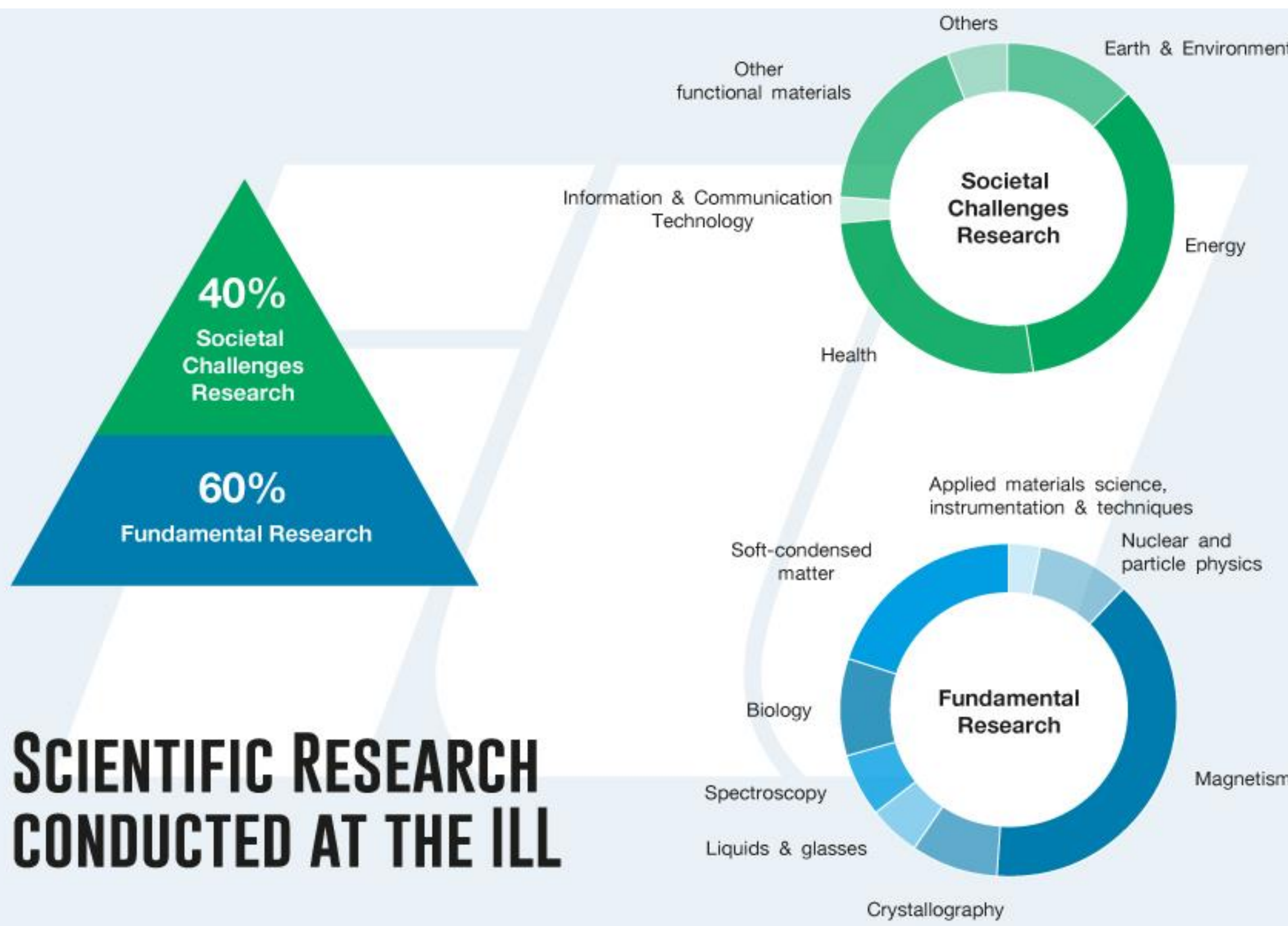
Dynamique



Complémentaire
des rayons-X,
de la lumière,
de la RMN,
de la microscopie
électronique



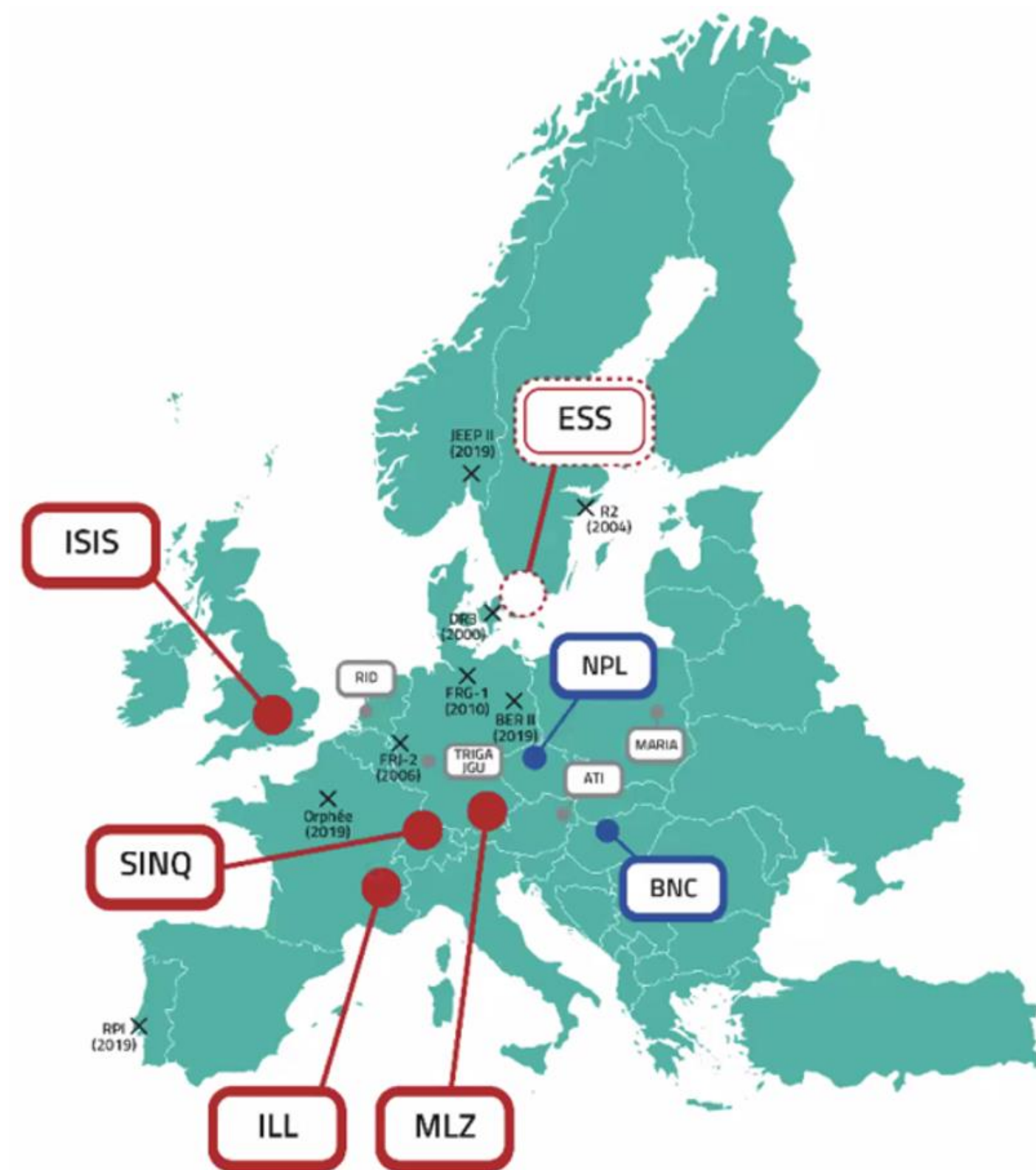
SCIENTIFIC RESEARCH CONDUCTED AT THE ILL





Diffusion neutronique en Europe

- Diffusion neutronique
 - Communauté ~6000 utilisateurs
- Europe
 - 2250 publications / an
 - 50% de la production mondiale





Projet ICONE

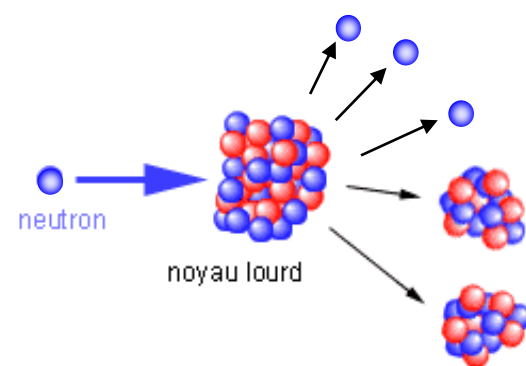


TECHNOLOGIES

« Troisième génération »

1950...

Réacteur
Fission

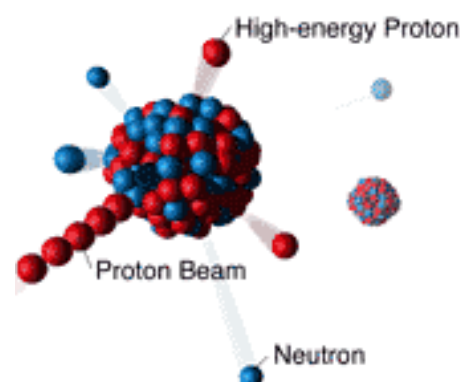


Cœur = 0.1 m³
Modérateur D₂O ~ 1m³
5-50 MW



1980...

Spallation
Protons ~GeV



Cible = 4 litres
Modérateur ~ 1 L (couplage faible)
0.2 – 2 MW

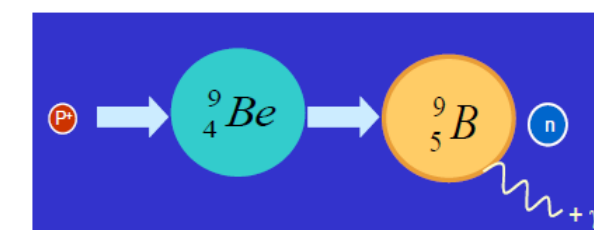


EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE

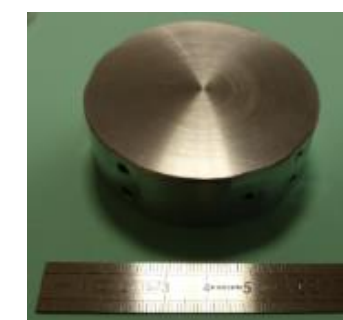
11

2010...

« Sources Compactes »
Réactions nucléaires
à basse énergie
Protons ~ (2 – 50 MeV)



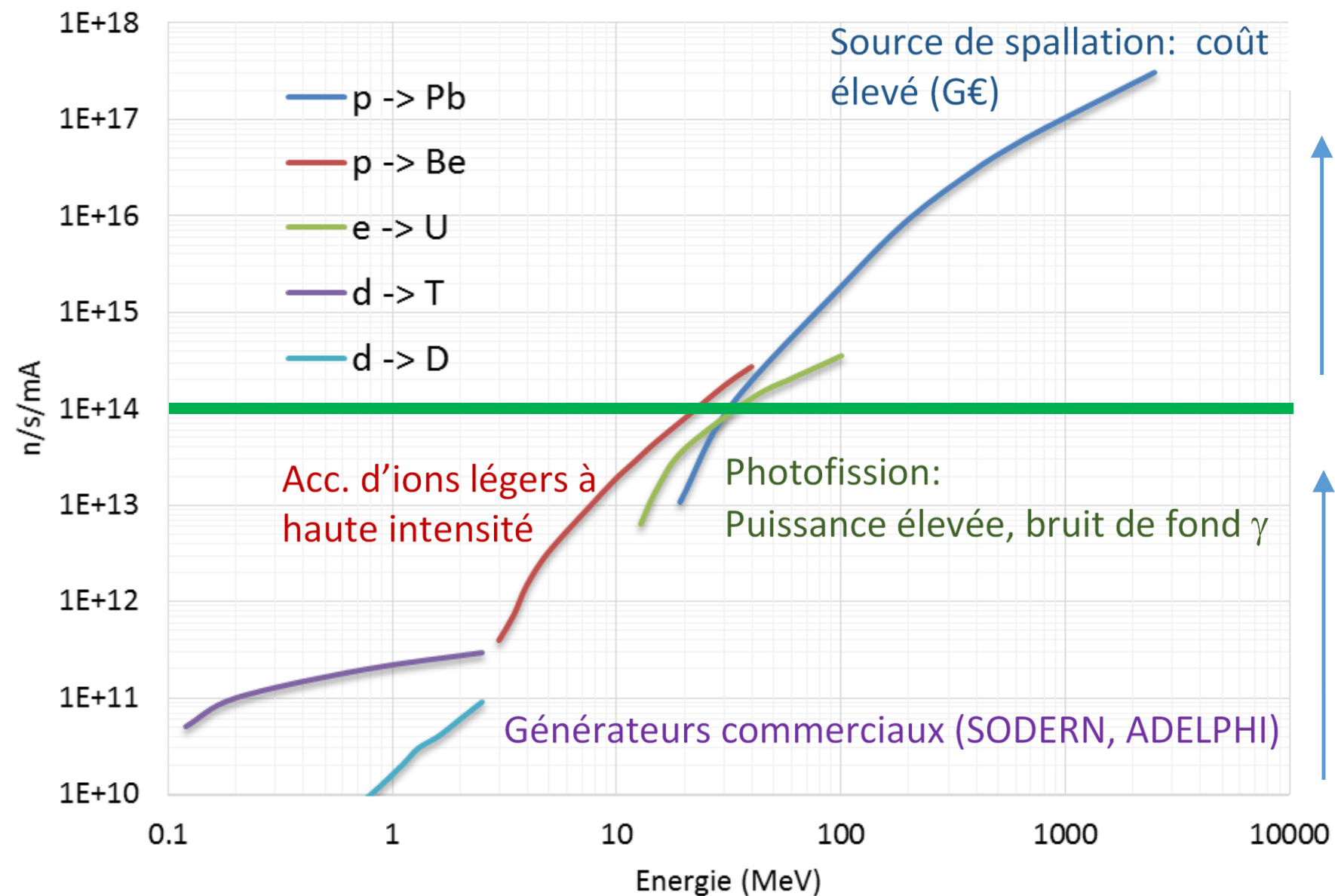
Cible = 0.05 litres
Modérateur ~ 1 L (couplage 90%)
10 – 100 kW





CANS - HiCANS

On gagne sur E_p , possibilité d'augmenter I_{av}
ISIS Vs ICONE : $I_{av} = 50\mu A$ Vs $I_{av} = 3.2mA$



Scalable Neutron Sources

0.01 kW	0.1 kW	1 kW	10 kW	100 kW
0.001-0.01 mA	0.01-1 mA	0.5-5 mA	1-20 mA	50-100 mA
$\sim 10^{11}$ n/s	$\sim 10^{12}$ n/s	$\sim 10^{13}$ n/s	$\sim 10^{14}$ n/s	$\sim 10^{15}$ n/s

10 Mio EUR

400 Mio EUR



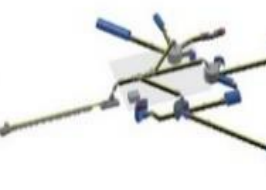
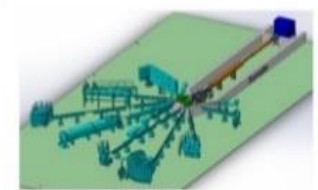
MIRROTRON
THE WORLD OF NEUTRON



LENS
The Laser Raman Neutron Source



Prototype



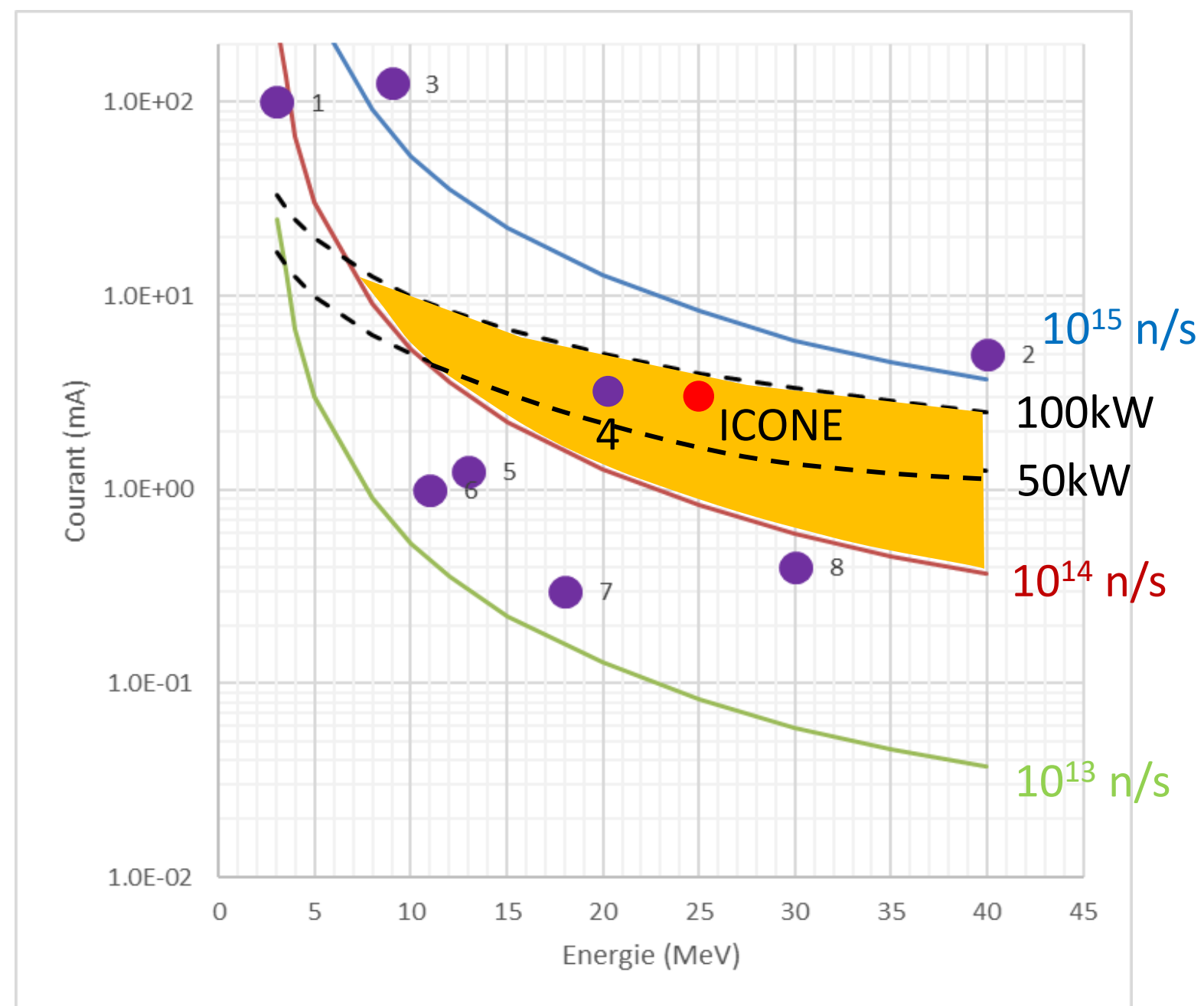
HiCANS

Borne inf. pour
une installation
de diffusion
neutronique

CANS



Positionnement ICONÉ

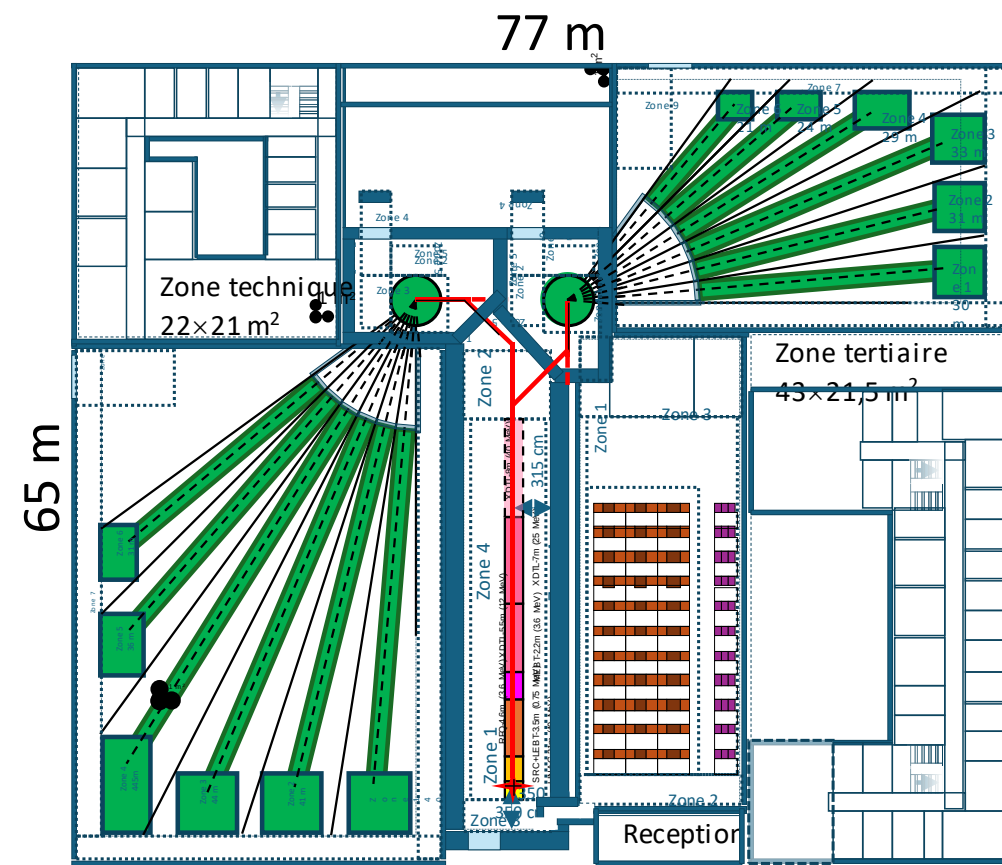


1	IPHI
2	SPIRAL2 / SARAF2
3	IFMIF LIPAC
4	ESS DTL1
5	CPHS
6	LANSAR PL-11
7	IBA KIUBE 300
8	IBA Cyclone 30

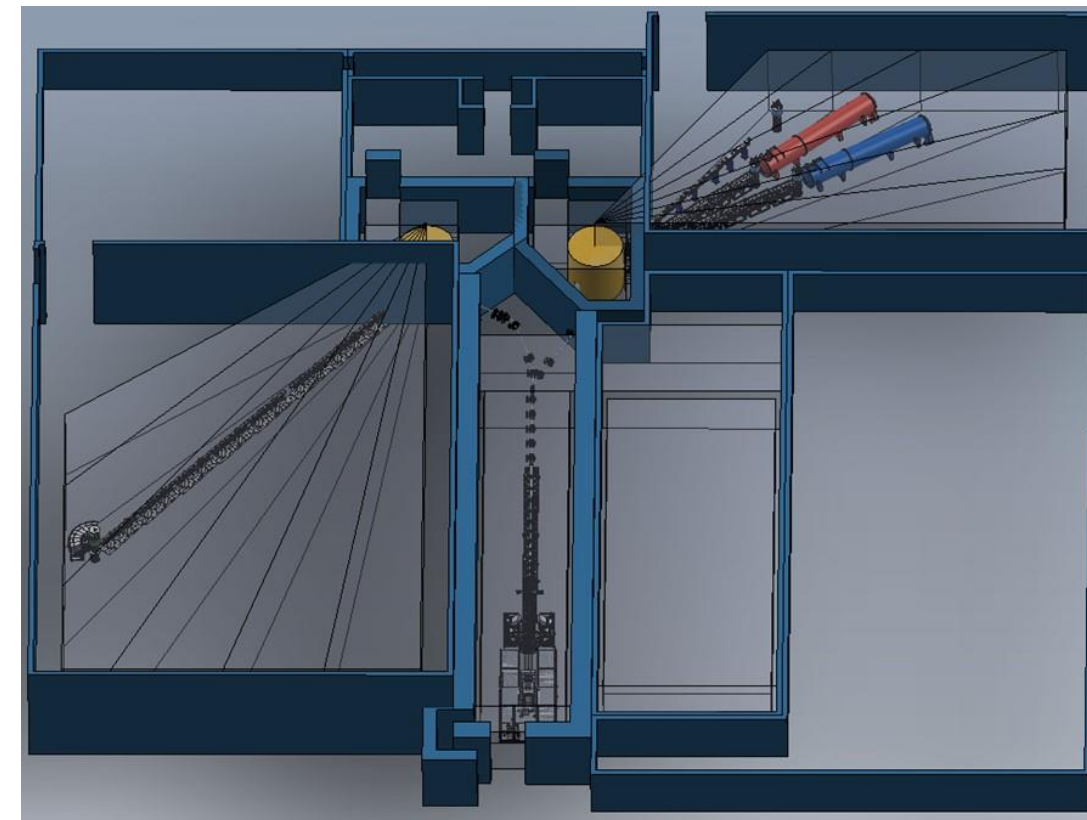
$E_p = 25 \text{ MeV}$
 $I_{\text{peak}} = 80 \text{ mA}$
 $I_{\text{av}} = 3.2 \text{ mA}$
C.U. 4%
 $P = 80 \text{ kW}$



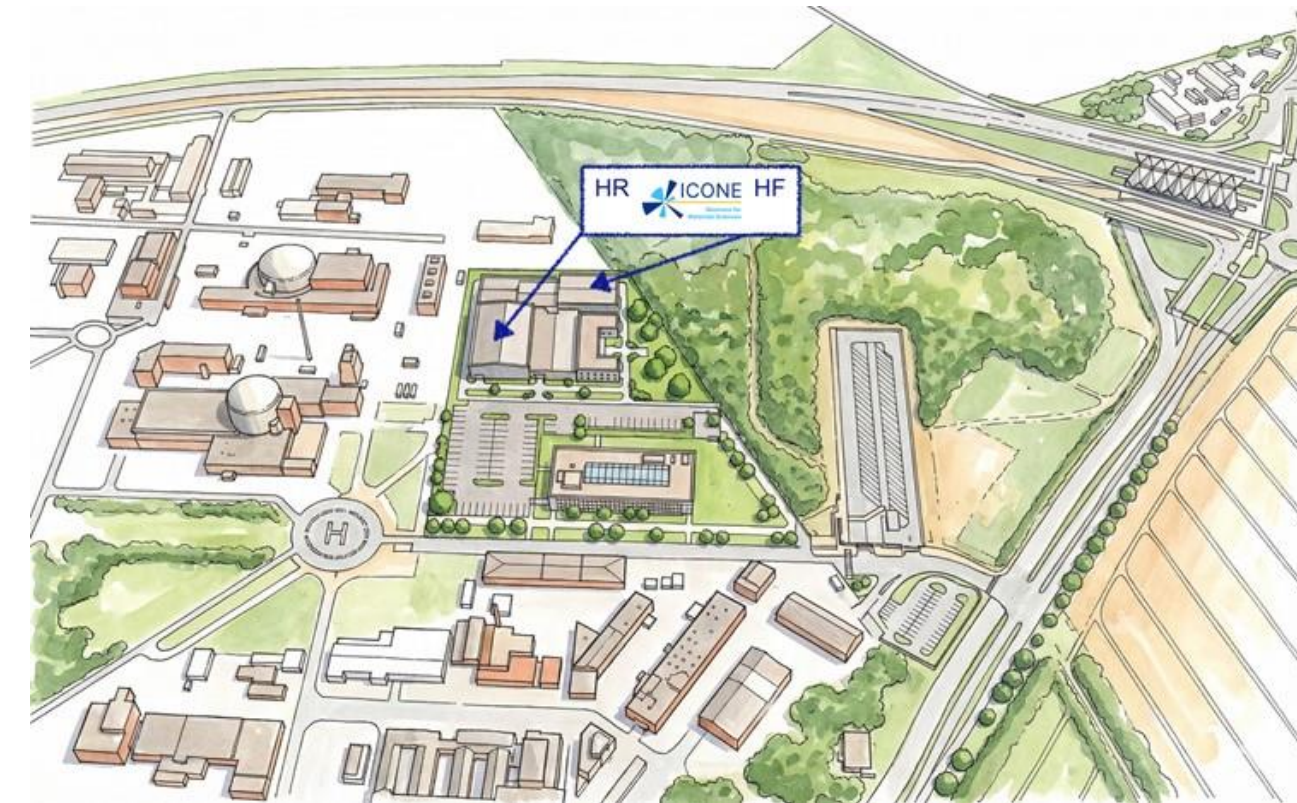
Le projet ICONE



Esquisses « fonctionnelle »



Maquette 3D



Implantation

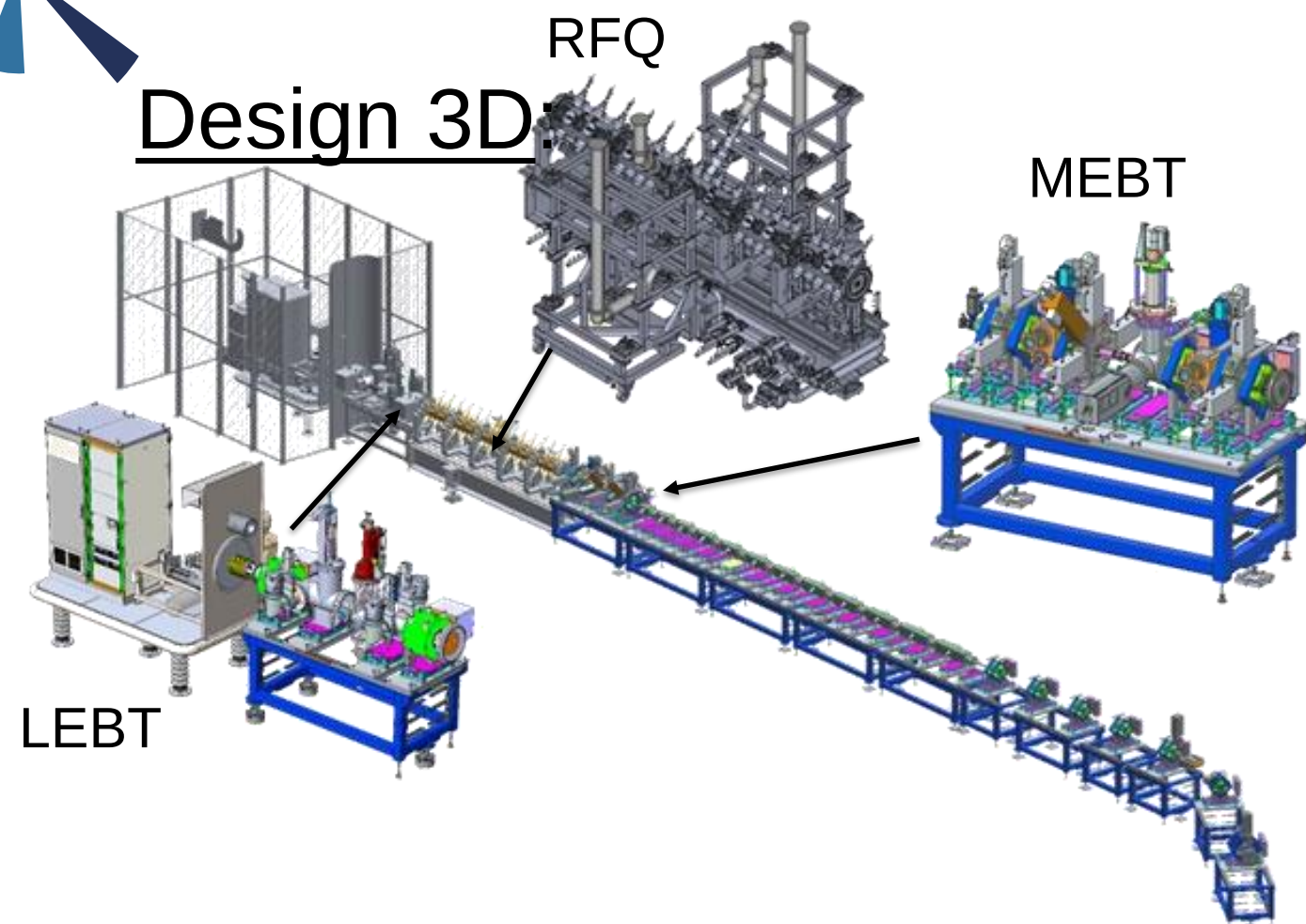
$E_p = 25 \text{ MeV}$, $I_{av} = 3.2\text{mA}$, $I_{peak} = 80\text{mA}$, Power = 80kW, D.C. = 4%

Target Station 1: High Flux – Low resolution : 20Hz, $w = 2\text{ms}$

Target Station 2: Higher resolution : 50 Hz, $w = 400\mu\text{s}$



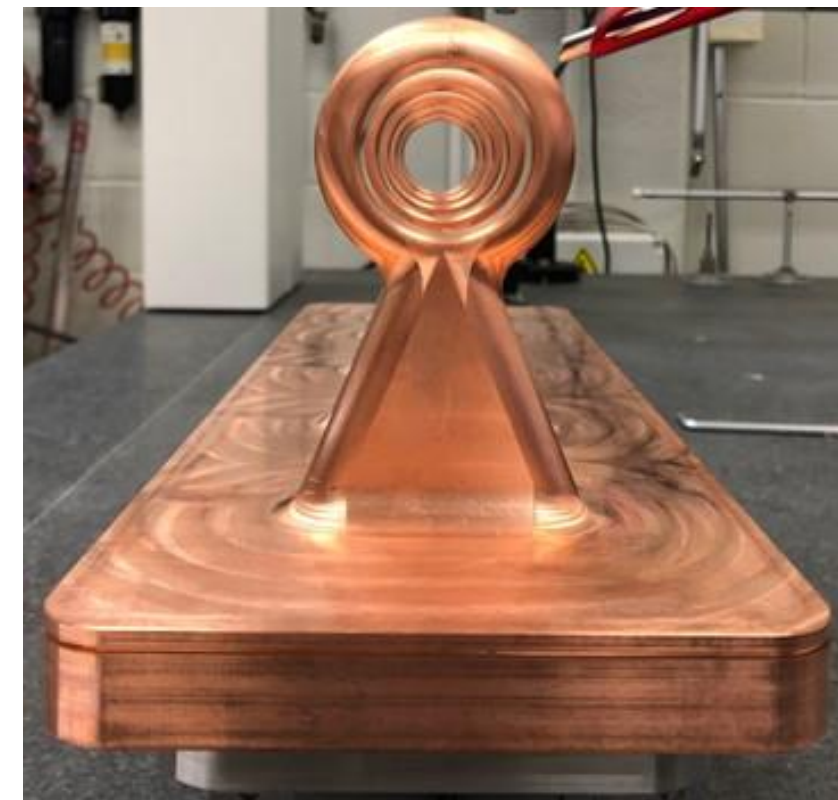
Les briques du projet ICONE



Proto Qpôle: fabriqué, tests magnétiques en 2026



Proto cavité: fabriquée, tests puissance en 2026
(déjà testé : fréquence, Q, étanchéité eau/vide)



Nous sommes prêts à **engager la construction** du linac.

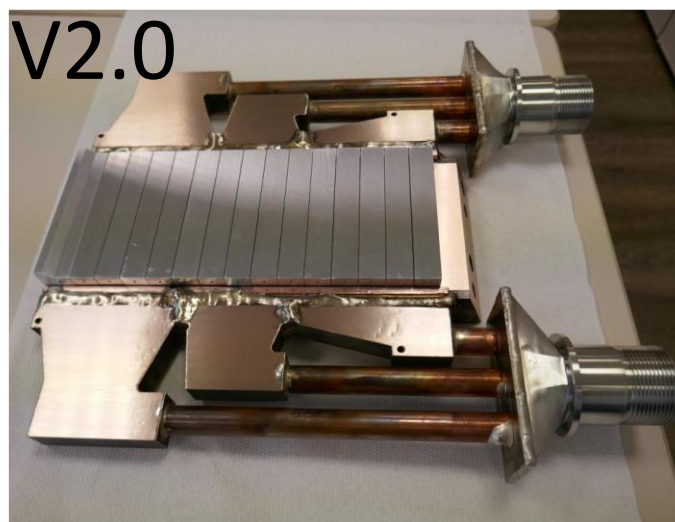


Cible-Modérateurs

Modérateurs : H_2O (300K) + pH_2 (20K) + Be (réflecteur)

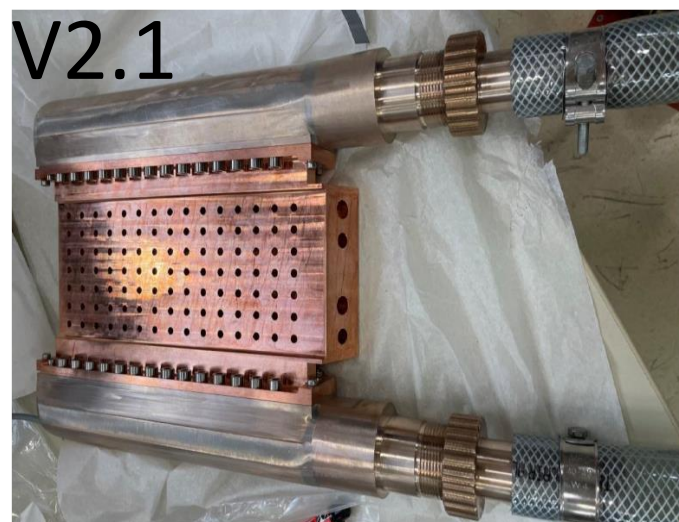
Cible ALBeMet

V2.0

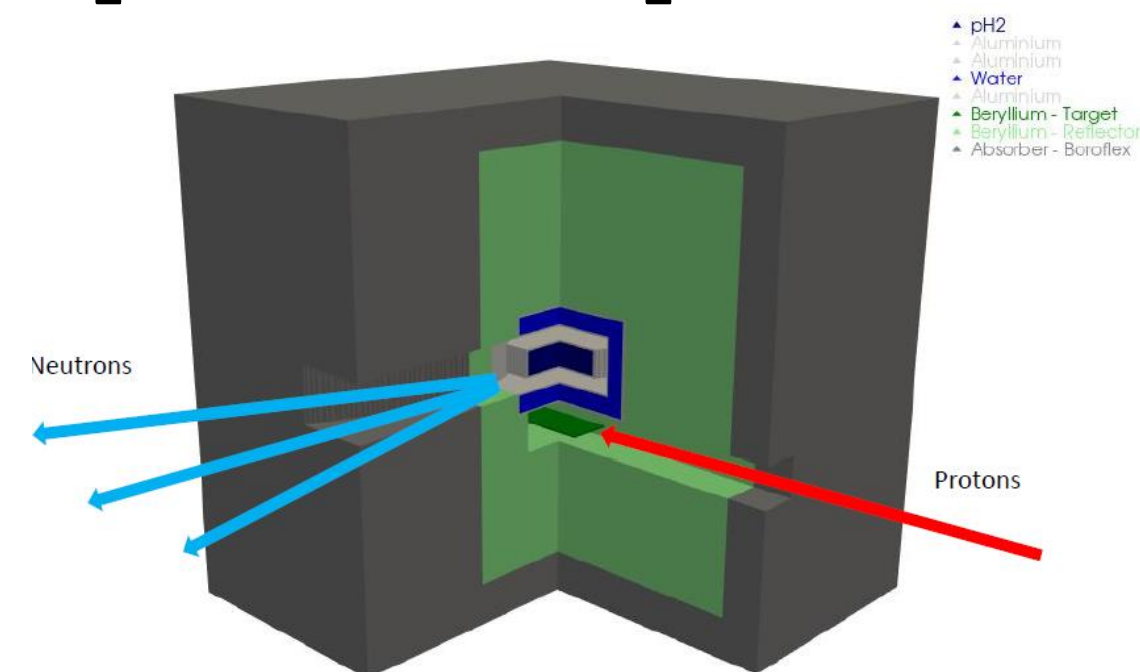


V2.0 testée sur IPHI
(~300 h ICONE, sans pb.)

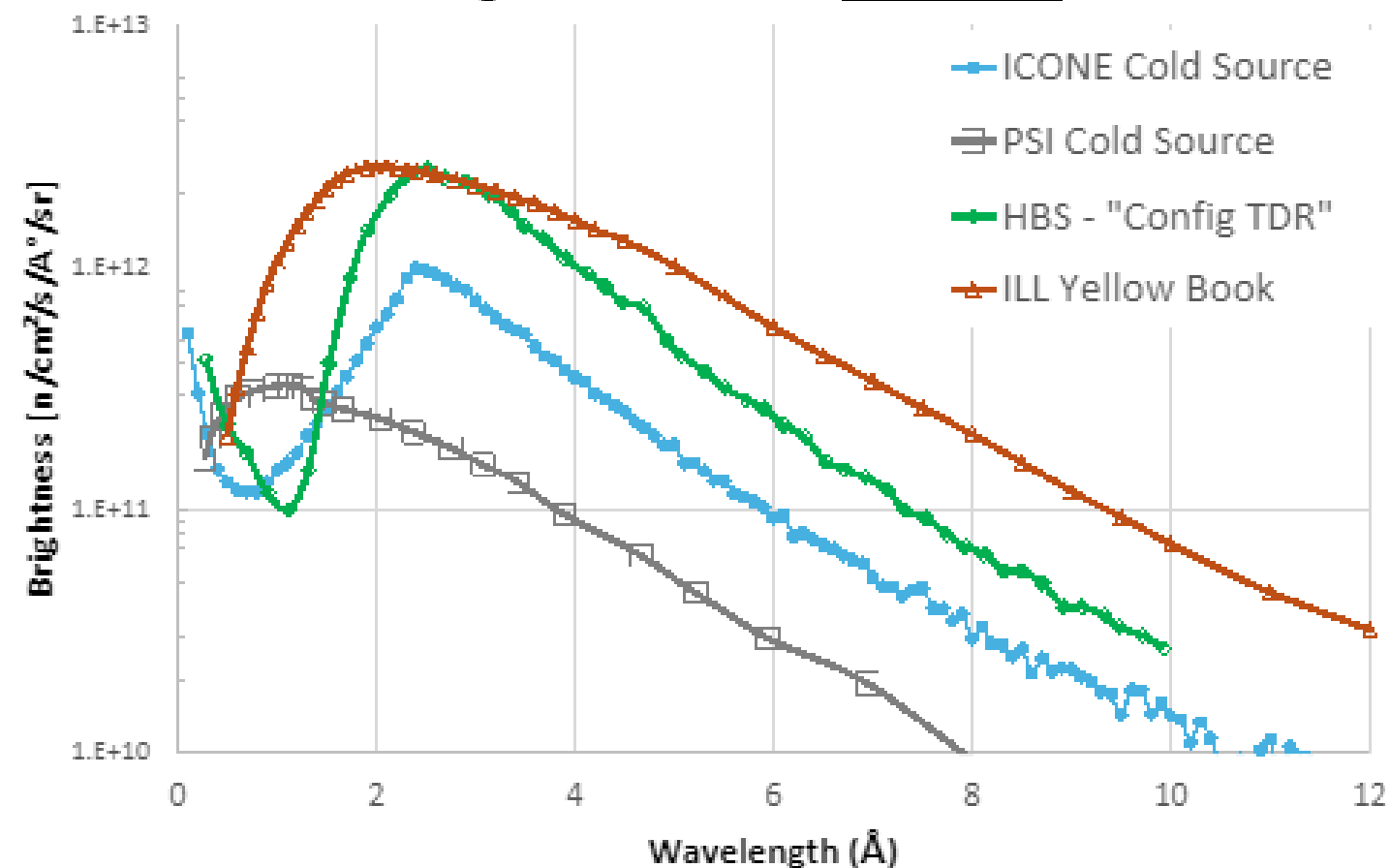
V2.1



V2.1 refroidissement
qualifié (1000 h)



Peak brightness of different cold sources



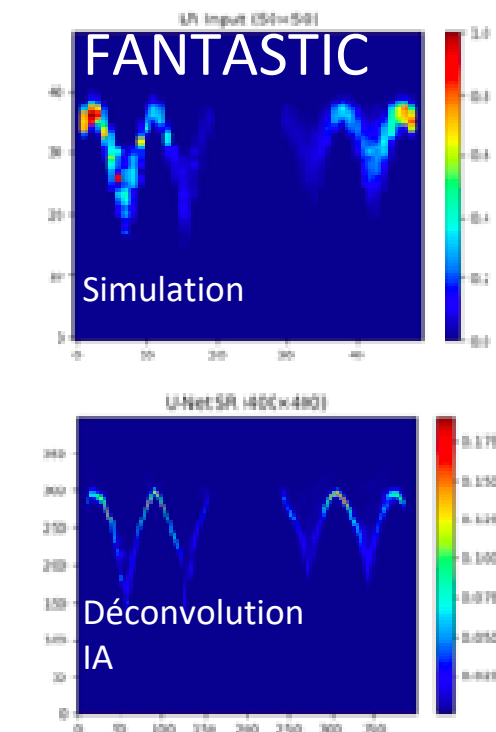
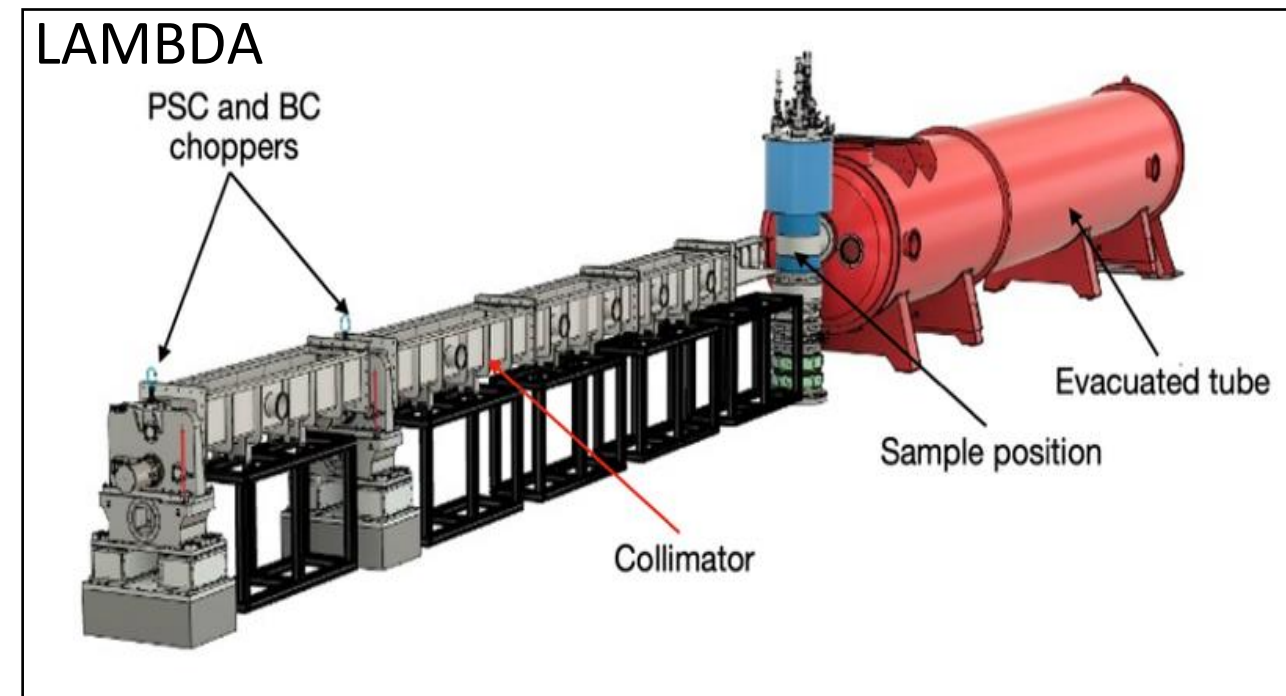
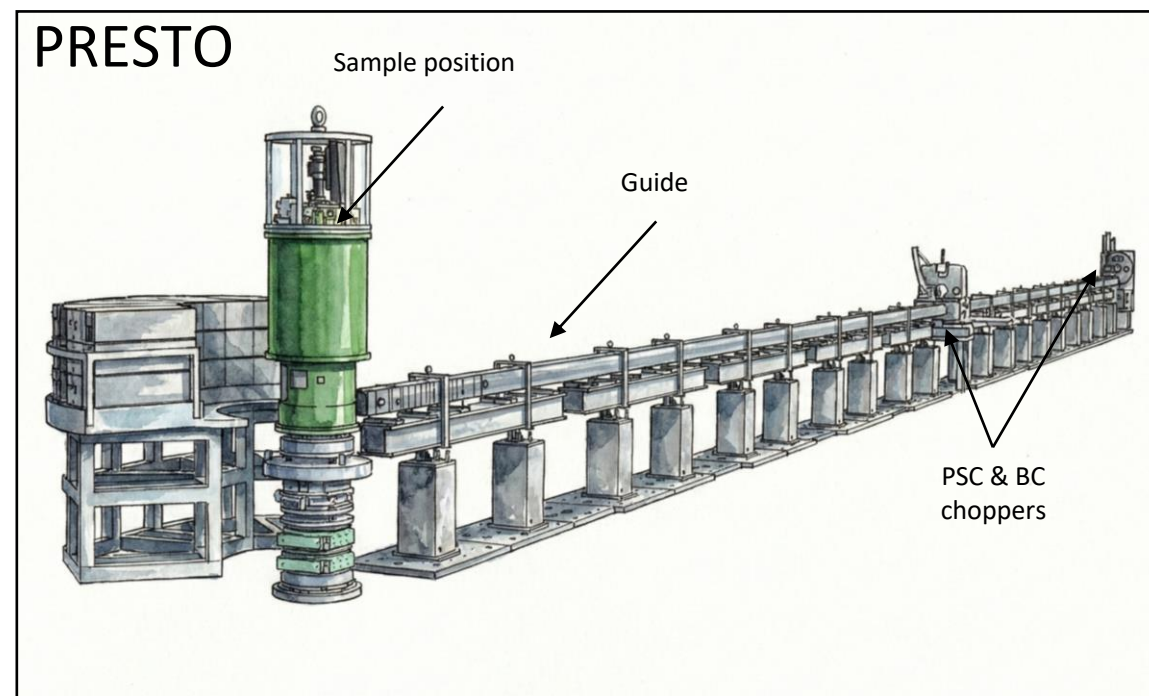
Un design **robuste** :

- Pas de mouvement de cible
- Faible charge thermique sur les modérateurs
- Cryogénie thermo-siphon (pas de pompe)
- Peu de dpa

Instrumentation



Maturité			
PRESTO (diffracto)	Exp. virtuelles	PRECIS (diffracto)	Design, resolution
LAMBDA (SANS)	Exp. virtuelles	INEDIT (spectro)	Design, resolution
PREMS (reflecto)	Exp. virtuelles	NANOSANS (SANS)	Concept
FANTASTIC (spectro)	Exp. virtuelles	CONTEXT (diffracto)	Thèse
TULIP (IMAGING) 	Design, resolution	LiTe-HR	Diag source + Multi-objectifs
GOLF (ppga) 	Design + performances	LiTe-HF	Multi-objectifs



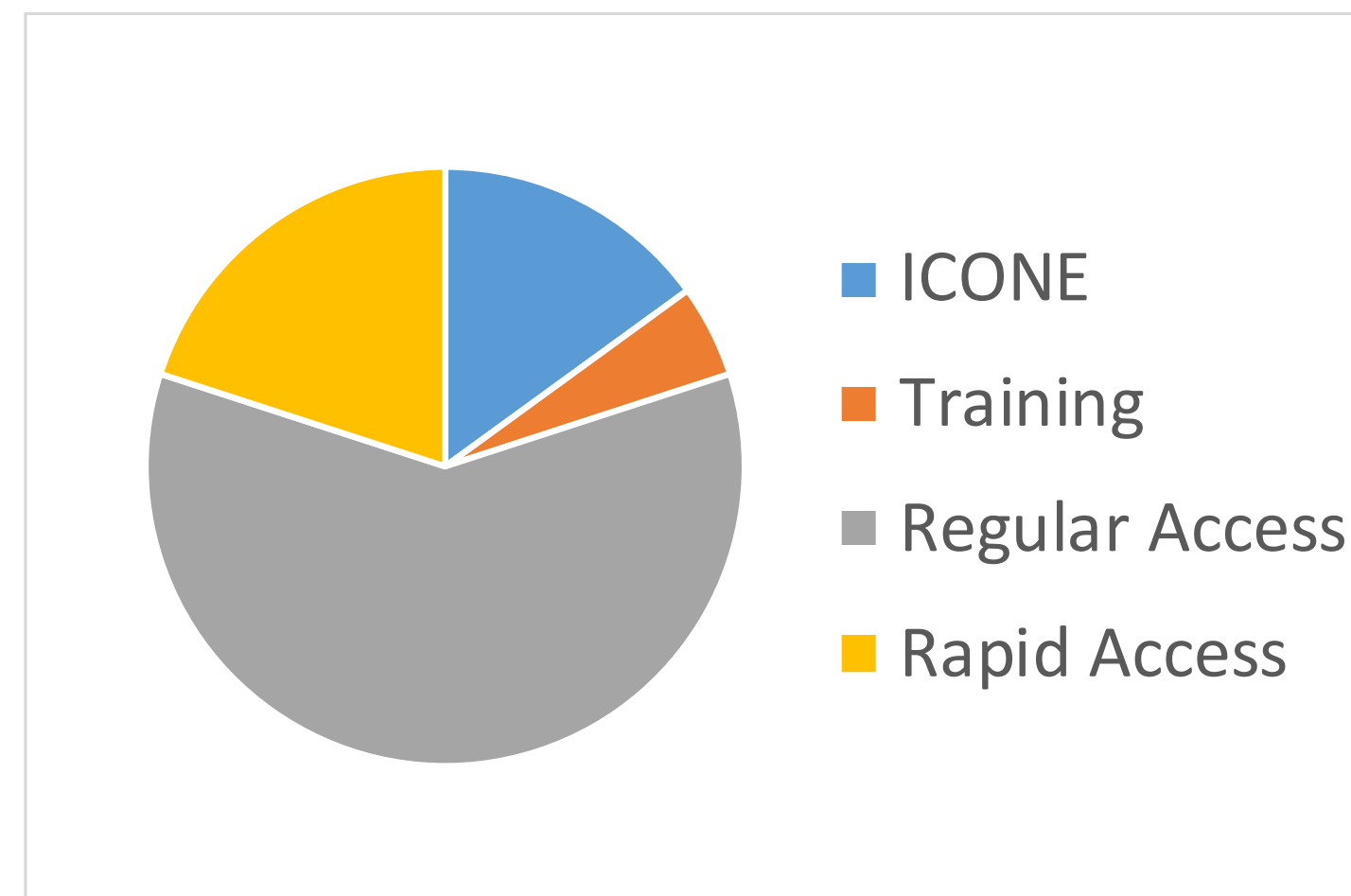
Nous sommes **prêts à engager l'ingénierie de 4 instruments**



User program / access mode

Operation 180 days/year – Users 160 days/year

Instrument	Average Run time	Nr. Run / year
SANS1 (soft matter)	2.5 days	64
SANS2 (hard matter)	5 days	32
Reflectometer	5 days	32
Radiography	5 days	32
Powder 1	2.5 days	64
Powder 2	5 days	32
Direct TOF	5 days	32
Inverse TOF	15 days	10
Hot neutrons	10 days	16
Spin-Echo	15 days	10
TOTAL		324



- Potentiel de plus de 300 runs expérimentaux par an
- Collaboration avec 300-400 chercheurs annuellement
- Potentiel de 100-150 publications / an



Conclusions and Outlook

- **Les sources de type HiCANS offrent potentiellement des performances identiques à des réacteurs de recherche ou des sources à spallation de puissance moyenne (pour la diffusion neutronique)**
- **Avant-Projet Détaillé réalisé en 2024-2025**
 - Certaines parties « prêtes à construire » (accélérateur en particulier)
- **La France dispose de toutes les compétences techniques pour construire une source de type HiCANS et l'exploiter**
 - Accélérateurs
 - Cible – Modérateur
 - Instrumentation de diffusion neutronique
 - Traitement des données
 - **Des utilisateurs (~800)**



Acknowledgments

Plus de 50 personnes contribuent à l'Avant-Projet Détaillé ICONE

CEA/DRF/IRAMIS/LLB UMR12 CEA - CNRS

CEA/DRF/IRAMIS/NIMBE

CEA/DRF/IRFU/DACM/LEDA

CEA/DRF/IRFU/DACM/LISHA

CEA/DRF/IRFU/DIS/LCAP

CEA/DRF/IRFU/DIS/LDISC

CEA/DRF/IRFU/DIS/LEIGE

CEA/DRF/IRFU/DIS/LRI

CEA/SPR



CNRS-N&P/LPSC

INFN

MLZ





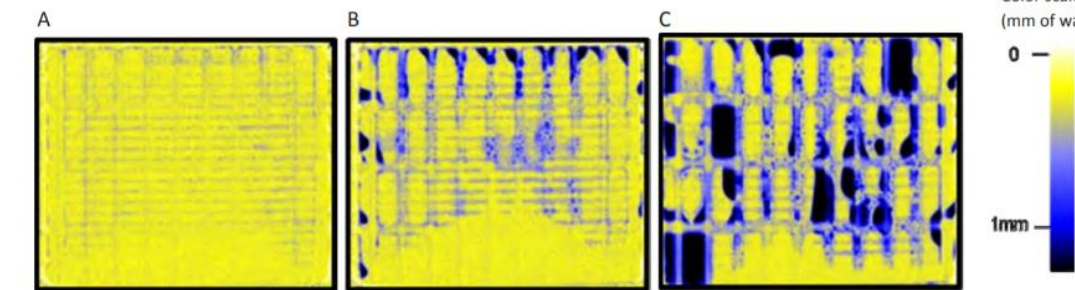


Exemples LLB – Orphée / Energie

➤ Amélioration du fonctionnement de piles à combustibles (BIC – DRT)

- Visualisation in-situ du fonctionnement de la pile à combustible
- Correction des simulations

Suivi du noyage d'une cellule PAC en cas d'écart de fonctionnement lié à des gradients de températures.



➤ Bouchage des pipelines par les pétroles lourds

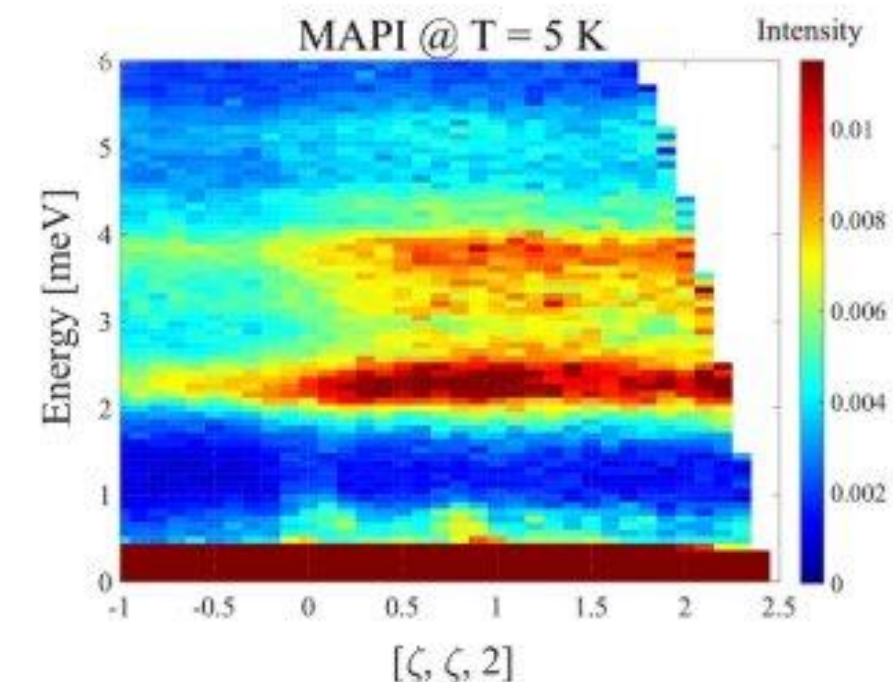
- SANS permet d'étudier les mécanismes de blocage

➤ Observer les dynamiques de diffusion dans les électrolytes pour batteries

- Les spectroscopies QENS et de spin-écho permettent d'étudier les dynamiques de diffusion à différentes échelles spatiales.

➤ Amélioration de l'efficacité de cellules photovoltaïques et matériaux thermo-électriques

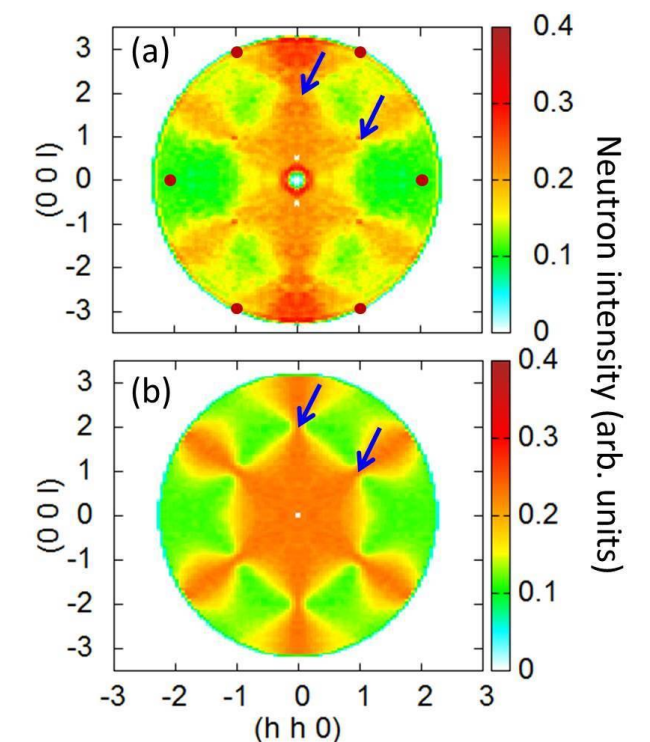
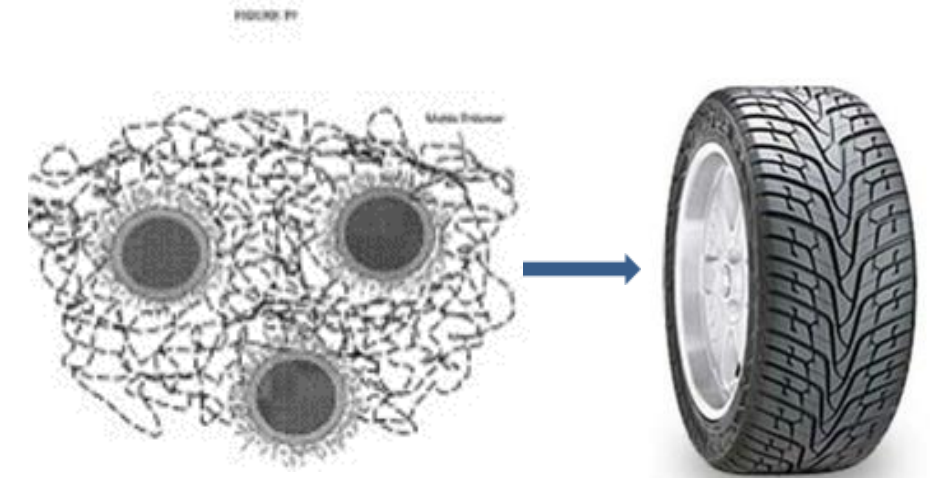
- Réflectivité de neutrons sur des couches minces
- Spectroscopie des excitations de réseau





Exemples à LLB – Orphée / Matériaux

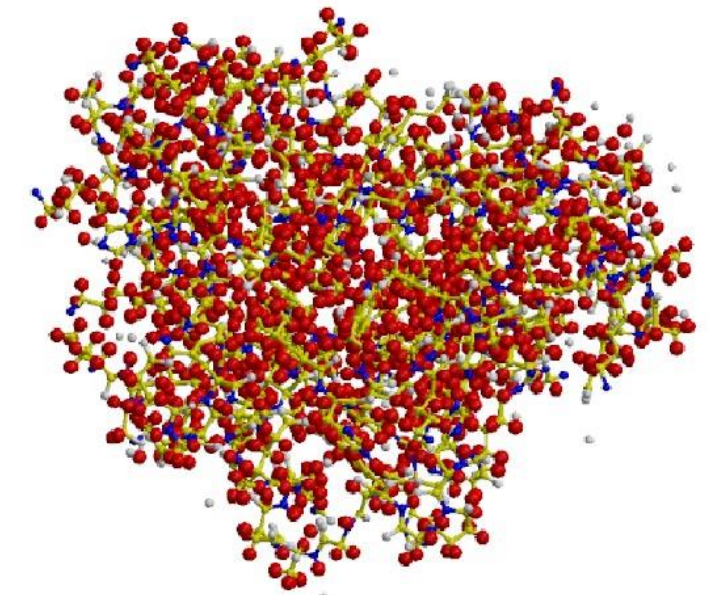
- Renforcement des matériaux composites polymères par des inclusions de nanoparticules
 - SANS permet de comprendre l'organisation des nanoparticules
- Renforcement des alliages métalliques par des nanoparticules
 - Inclusion de nitrures pour les alliages hautes performances
 - alliages nucléaires ODS pour les nouvelles générations de centrales
- Etude de nouveaux matériaux magnétiques
 - Diffraction / Spectroscopie / Réflectivité





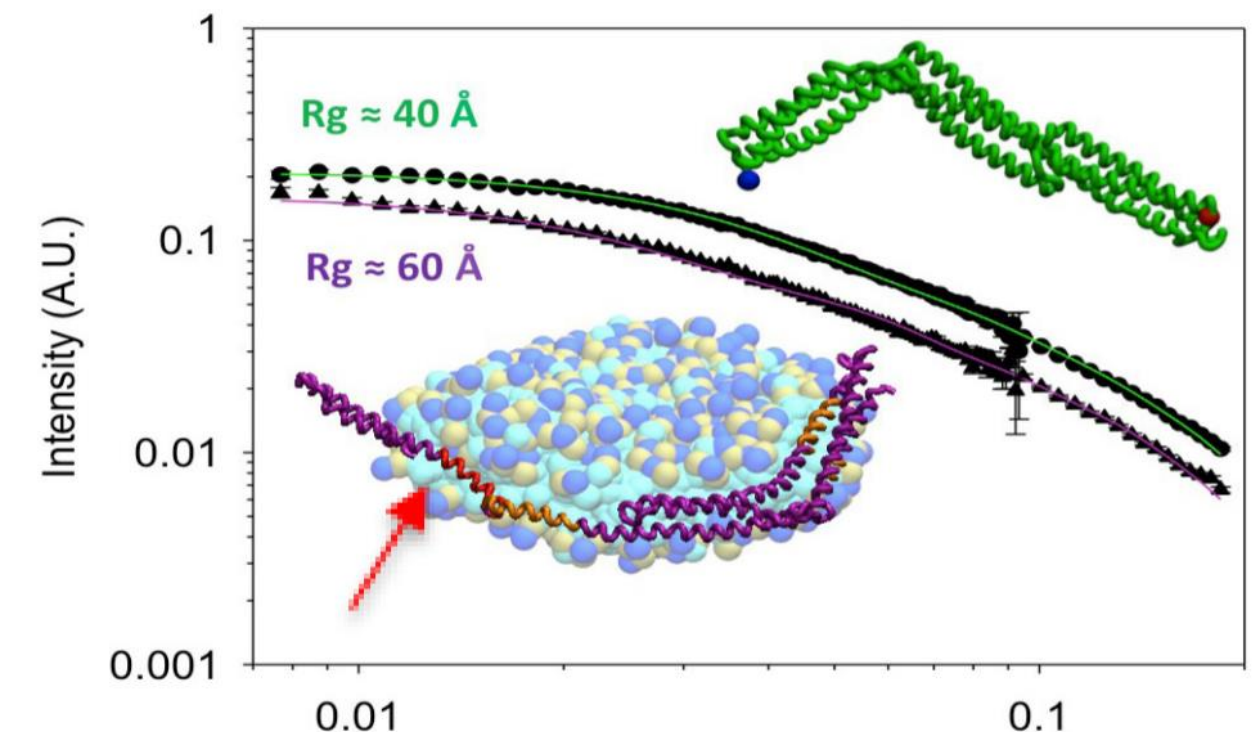
Exemples à LLB – Orphée / Santé

- Hydratation des protéines
 - La diffraction neutronique permet de localiser les molécules d'eau autour des protéines biologiques pour mieux comprendre leur fonctionnement.
- Interaction des protéines avec les membranes cellulaires
 - SANS / Réflectivité
 - Application à la compréhension de la myopathie ou de la maladie d'Alzheimer.



Tertiary structure of myoglobin determined by neutron diffraction

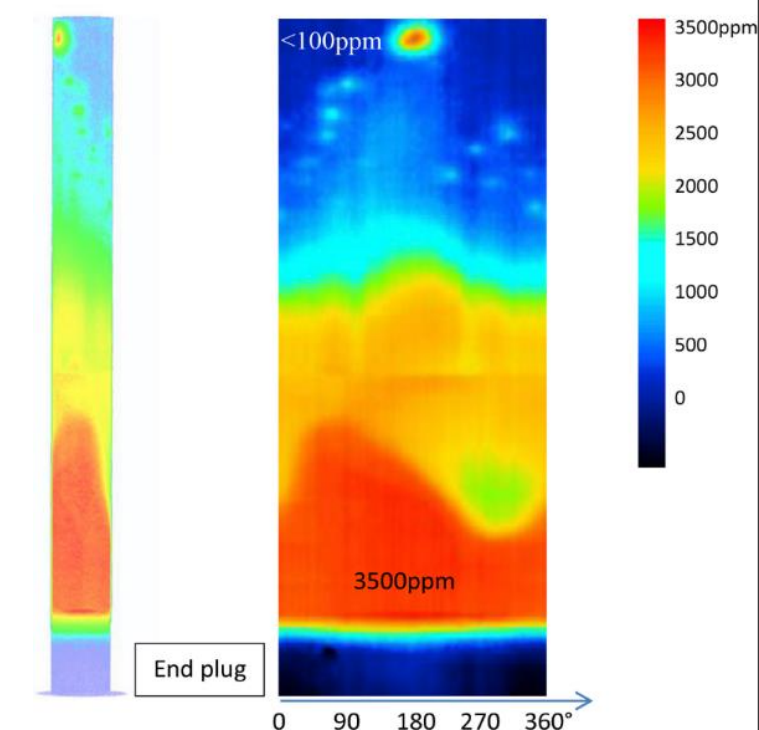
● nitrogen, ● carbon, ○ oxygen, ● hydrogen





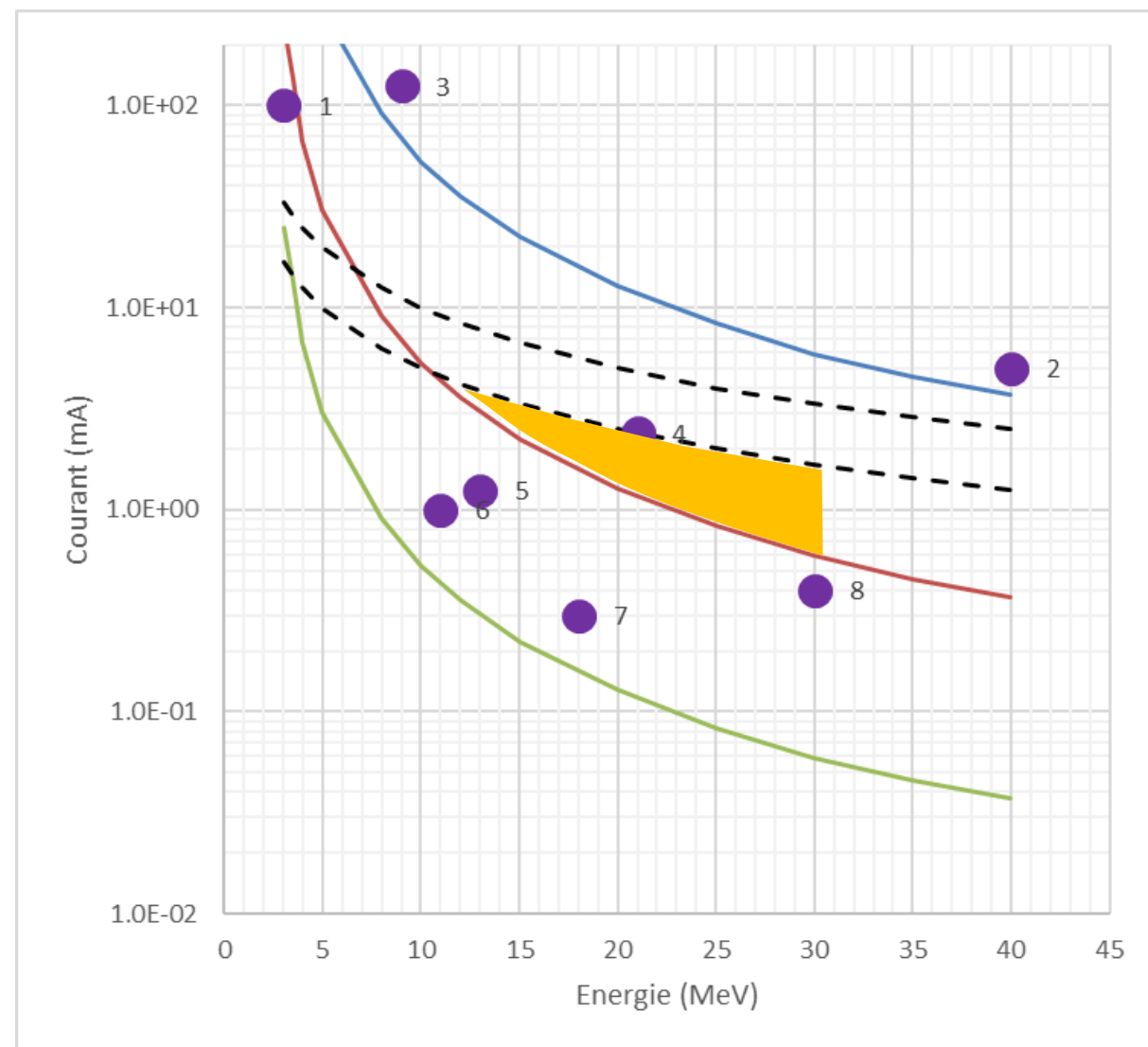
Exemples à LLB – Orphée / Nucléaire

- Vieillissement des aciers nucléaires sous irradiation
 - Suivi de la formation d'agrégats de Cu et fragilisation des aciers de cuve (étude par SANS)
 - Permet de prolonger la durée de vie des centrales nucléaires de 40 ans (valeur nominale) à 50 voire 60 ans.
- Amélioration de la résistance des gaines en cas d'accident de type Fukushima (perte de refroidissement dans le cœur)
 - Imagerie permet de comprendre les phénomènes d'hydruration et de fragilisation

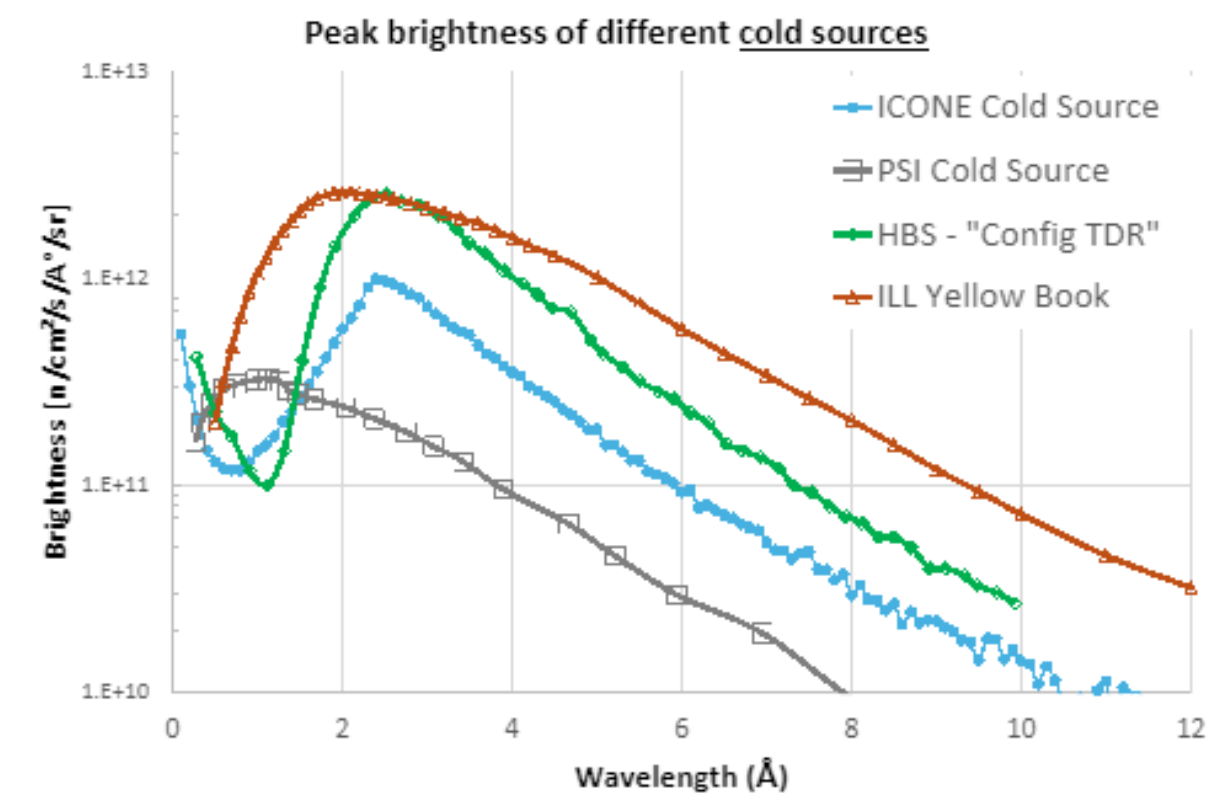
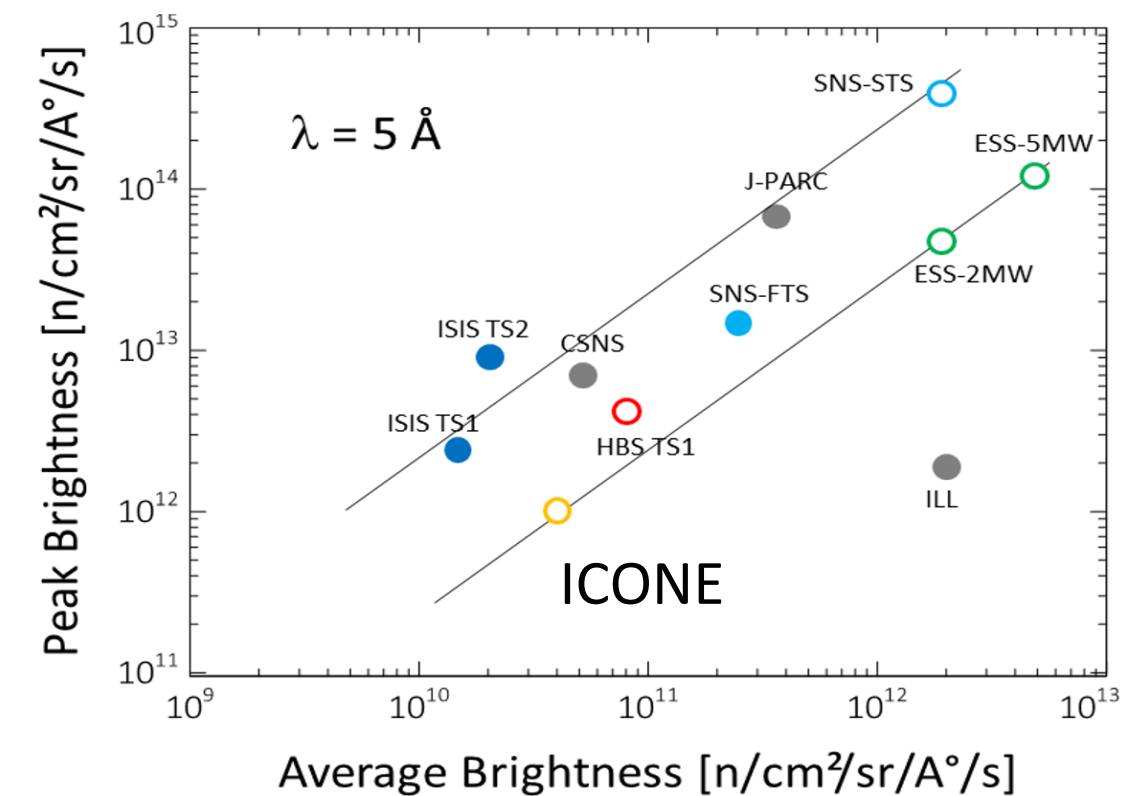
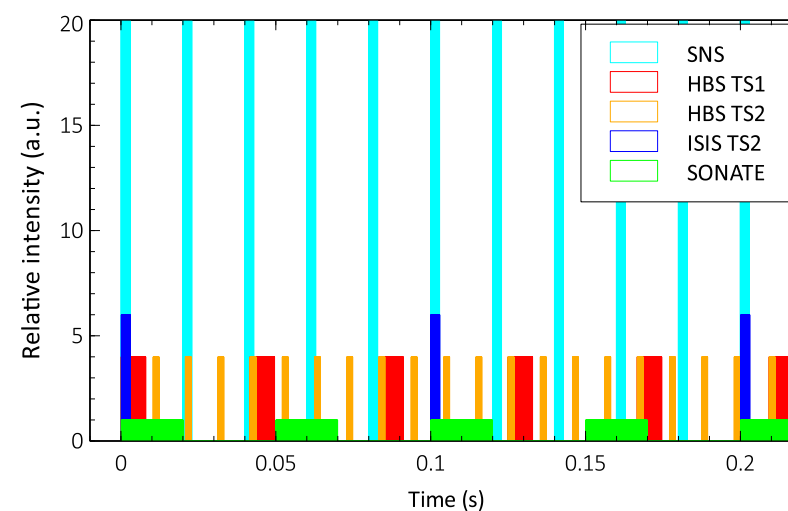




Positionnement ICONE

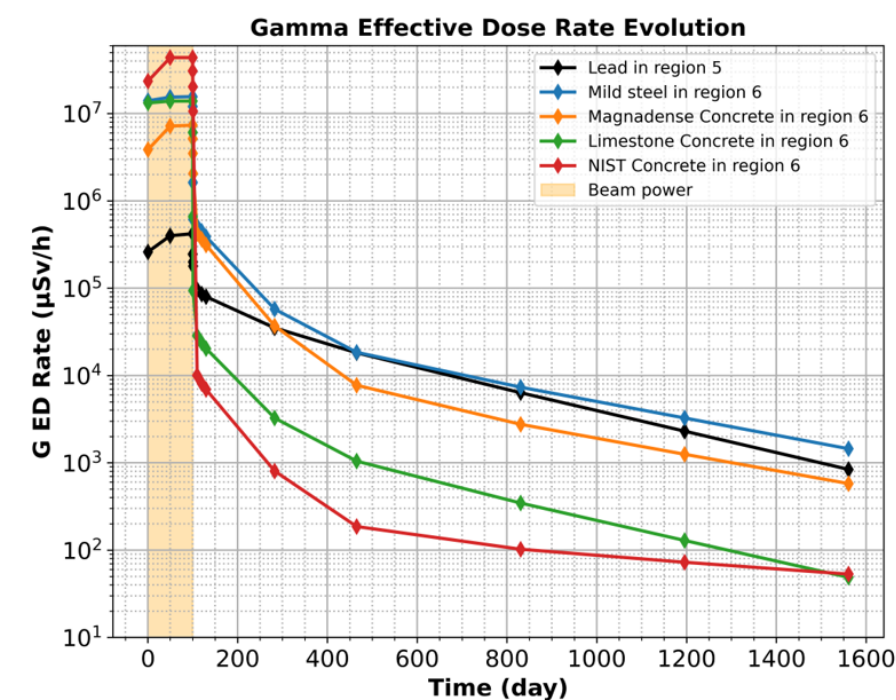
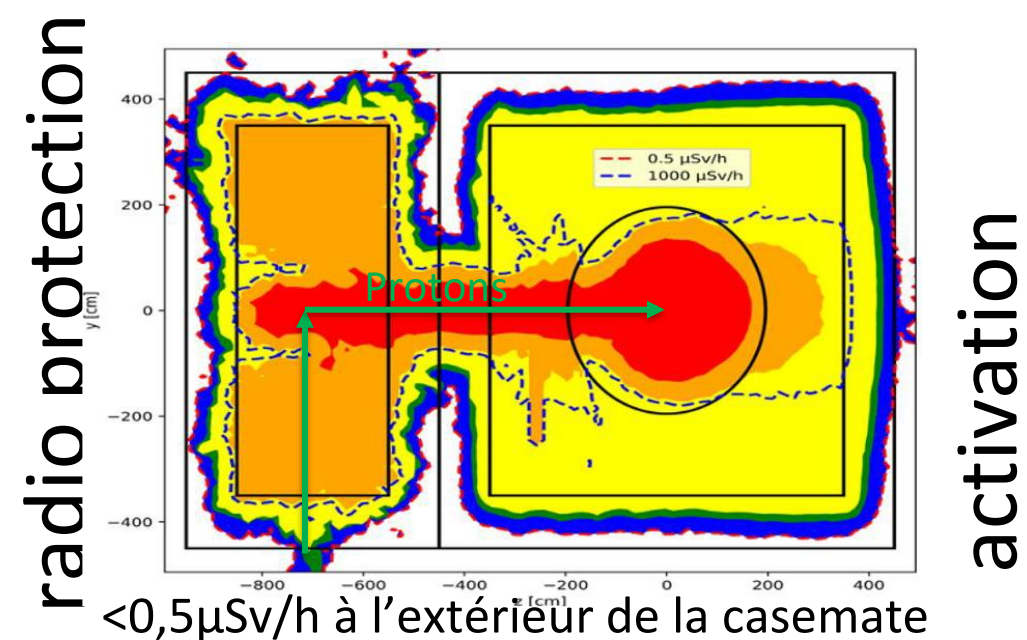


1	IPHI
2	SPIRAL2 / SARAF2
3	IFMIF LIPAC
4	ESS DTL1
5	CPHS
6	LANSAR PL-11
7	IBA KIUBE 300
8	IBA Cyclone 30





Radio-protection et activation



Inconvénient des neutrons → production de radionucléides
Vrai quel que soit l'accélérateur
En très grandes quantités sur ICONÉ (beaucoup de neutrons)

Ne pas être classé INB Installation Nucléaire de Base

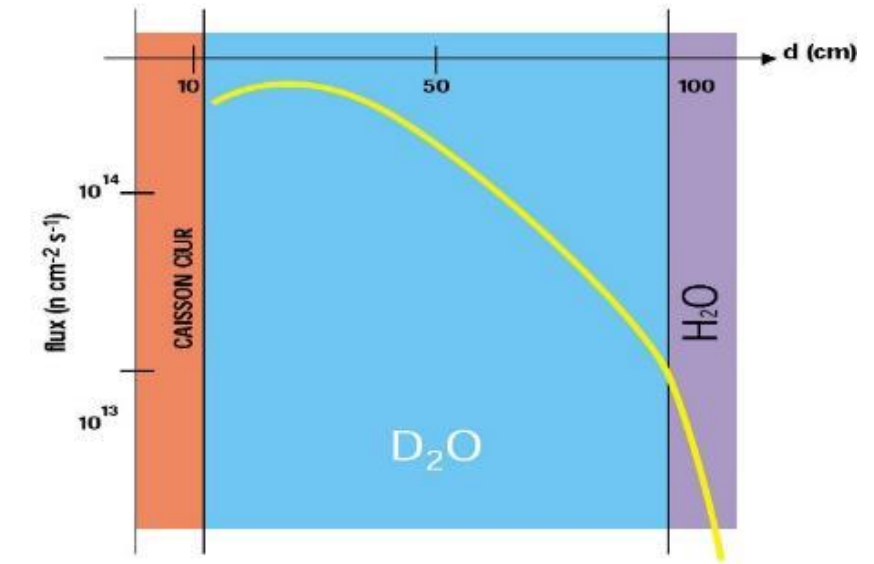
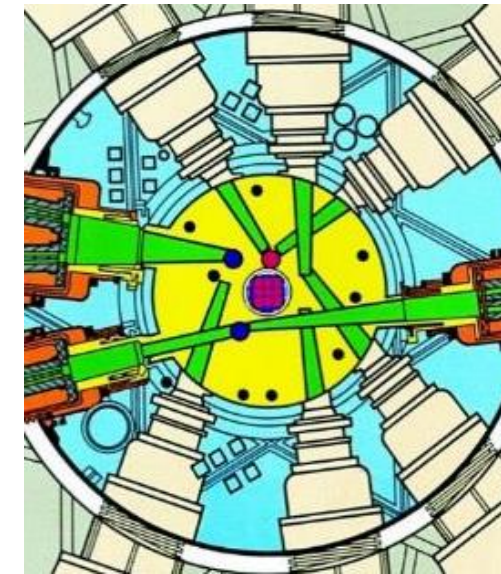


Maximiser la brillance

- Réacteur

Core = 0.1 m^3

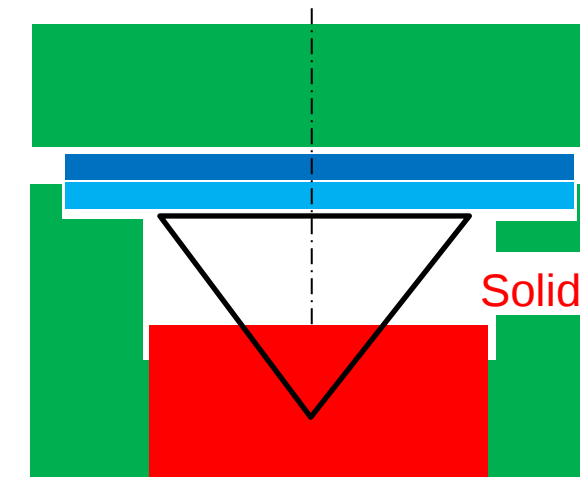
Moderator vessel $\text{D}_2\text{O} \sim 1\text{m}^3$



- Spallation

target = 4 litres

moderator ~ 1 litre (not too well coupled)



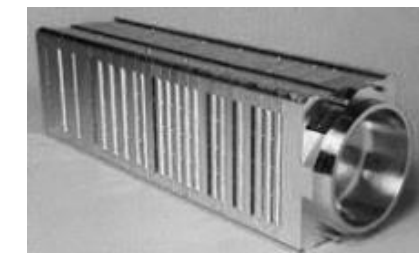
Réflector Be

Para-H2 thickness 1.5cm, diamètre $D_M = 15 \text{ cm}$

Premoderator H_2O

Thickness $e_{PM} = 2\text{cm}$ – diamètre $D_{PM} = 15 \text{ cm}$

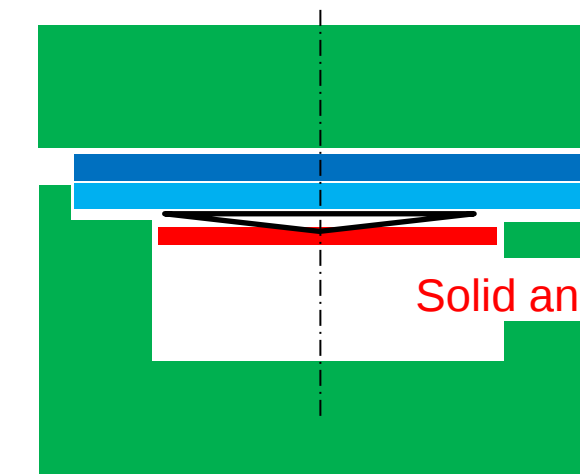
Solid angle = 1.2sr



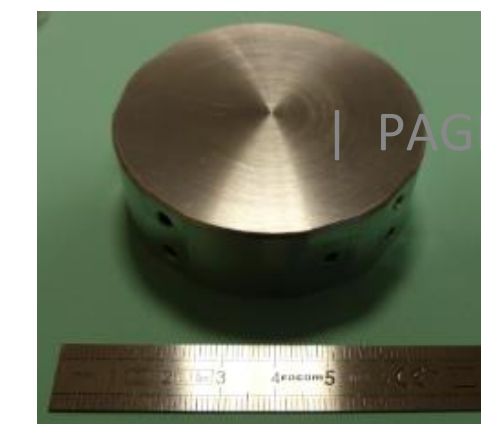
- Réactions nucléaires basse énergie

Target = 0.05 litres

moderator ~ 1 litre (coupling 90%)



Solid angle = 6sr





The ICONE Project

[ICONE White Book published 2023](#)





CANS dans le monde

- Sources en opération
- Sources en constructions
- CANS en projet





Initiatives a l'étranger

- **ELENA**

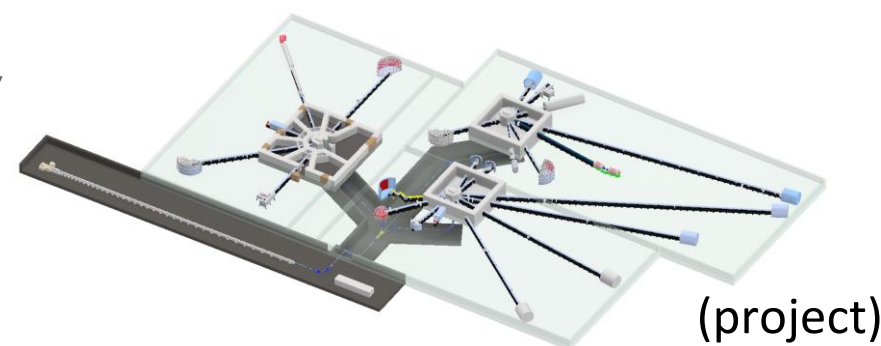
European Low Energy accelerator-driven Neutron facilities Association

- **LvB** in Hungary (MIRROTRON)



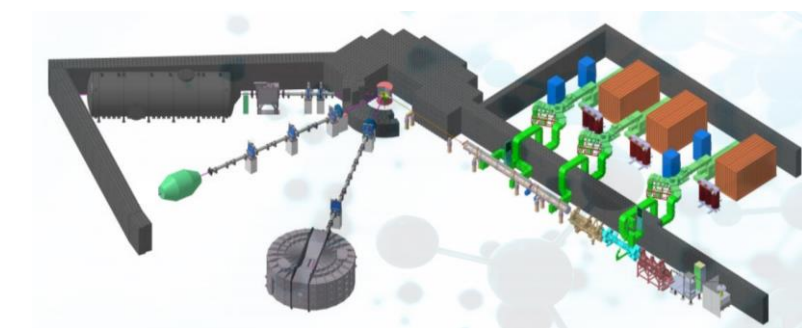
Commiss.
(2.5kW)

- **HBS** in Germany (FZJ / JCNS)

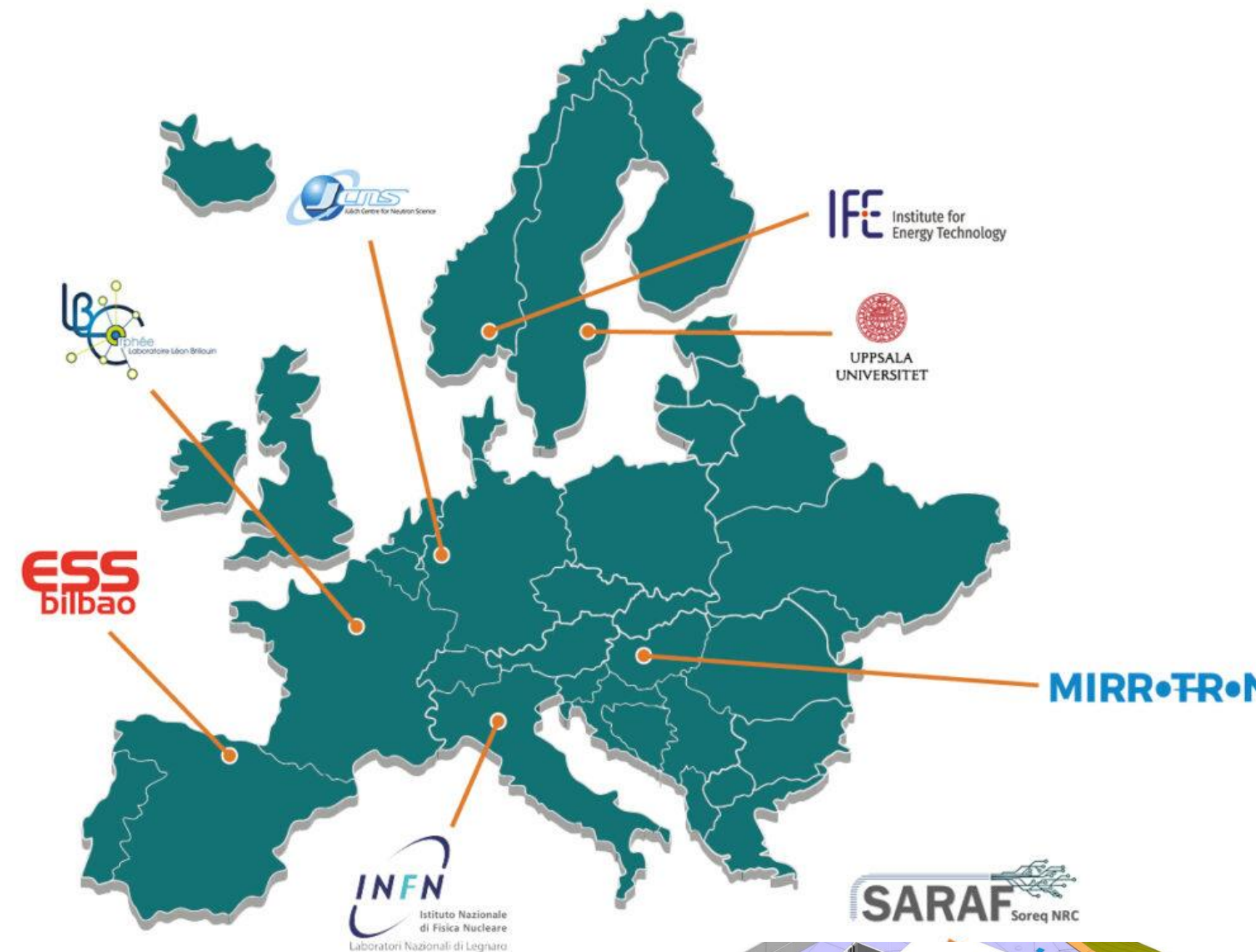


(project)

- **ARGITU** in Spain (ESS Bilbao)



(project)



Commiss.
(200kW, CW)

