De l’intérêt des cibles de haute puissance:

production de radionucléides
plateforme interdisciplinaire auprès de SPIRAL2

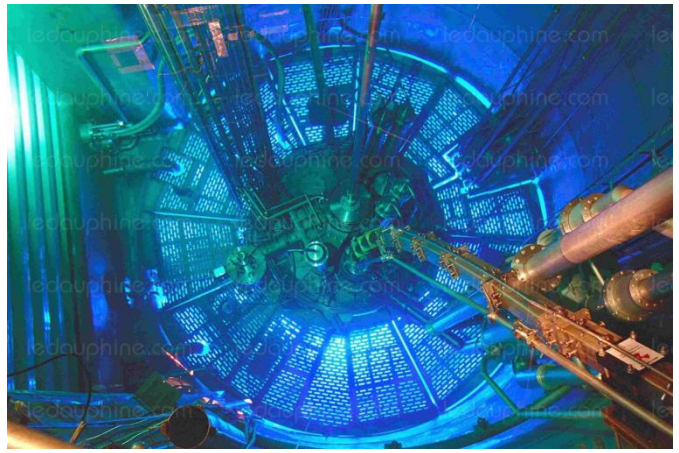
GANIL, SUBATECH, ARRONAX, IPHC, LPSC, CYCERON, CERN,…

La production de radionucléides

Réacteurs:

- Réaction induite par neutrons
- Fission

^{99}Mo, ^{131}I, ^{177}Lu, ^{188}W, ^{225}Ac ...



Accélérateurs

- Electrons pour obtenir des γ (photo-réaction)
- Réactions induites par protons, deutérons ou particules alpha
- Ions « lourds »
- Production de neutrons secondaires

^{18}F, ^{64}Cu, ^{67}Ga, ^{68}Ge, ^{82}Sr, ^{123}I, ^{201}Tl, ^{211}At, ^{225}Ac,...



Figure 2. A compact superconducting accelerator used for radioisotope production





Déchets radioactifs

- ^{232}Th(pour ^{212}Pb), ^{233}U (pour ^{225}Ac, ^{213}Bi)

Intérêts des accélérateurs

Avantages:

- Sécurité accrue : pas de matières fissiles
- Moins de problème de déchets radioactifs: déchets à vie relativement courte (Na-22, Mn-54,…)
- Cout de construction et d'installation plus faible
- Déploiement aisé

Contraintes:

- Sections efficaces des réactions utilisées faibles (< barn en général)
- Production de particules secondaires

Nécessité de travailler à haut courant

Exemple de temps d'irradiation / intensité:

- : 14h d'irradiation en deutons à 80 µA :20 GBq de ^{64}Cu ($T_{1/2}$=12.4 h)
- : 120h d'irradiation à 200µA : 22 GBq de ^{68}Ge ($T_{1/2}$ =270 j)

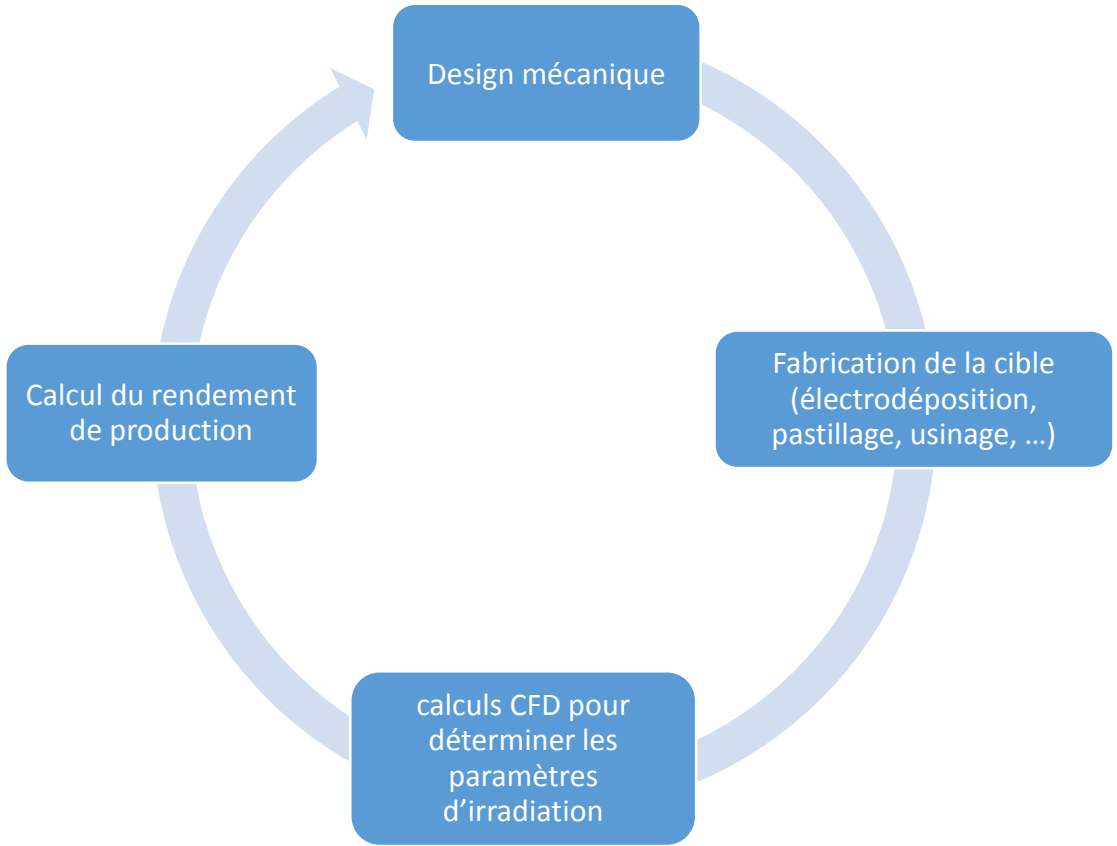
La production en accélérateur

Les étapes du développements:

Etape préliminaire:

- Identification de la réaction nucléaires à utiliser
- Choix de la gamme en énergie
- Choix de la forme chimique

} Détermination de l'épaisseur de cibles et de la charge thermique



Collaborations nécessaires entre:

- Physiciens
- Chimistes
- Bureau d'étude

Outils nécessaires:

- Outils de conception mécanique
- Modélisation Monte-Carlo
- Modélisation multiphysique

Deux exemples sur Arronax

Design d'une cible de production de strontium-82

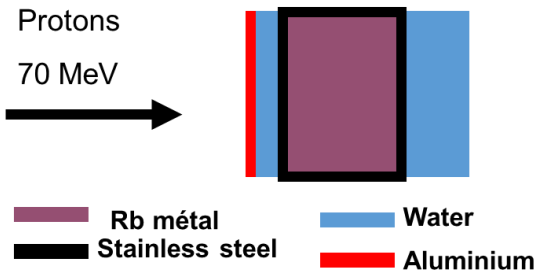
→ Production du rubidium-82 utilisé en imagerie cardiaque

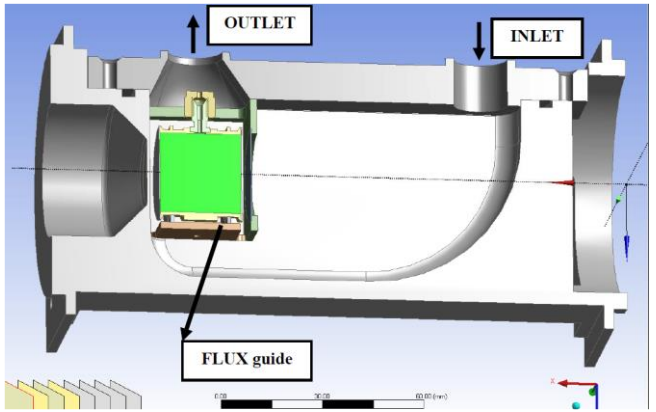
Réalisation d'une cibles de neutrons secondaires:

TheraneaM project

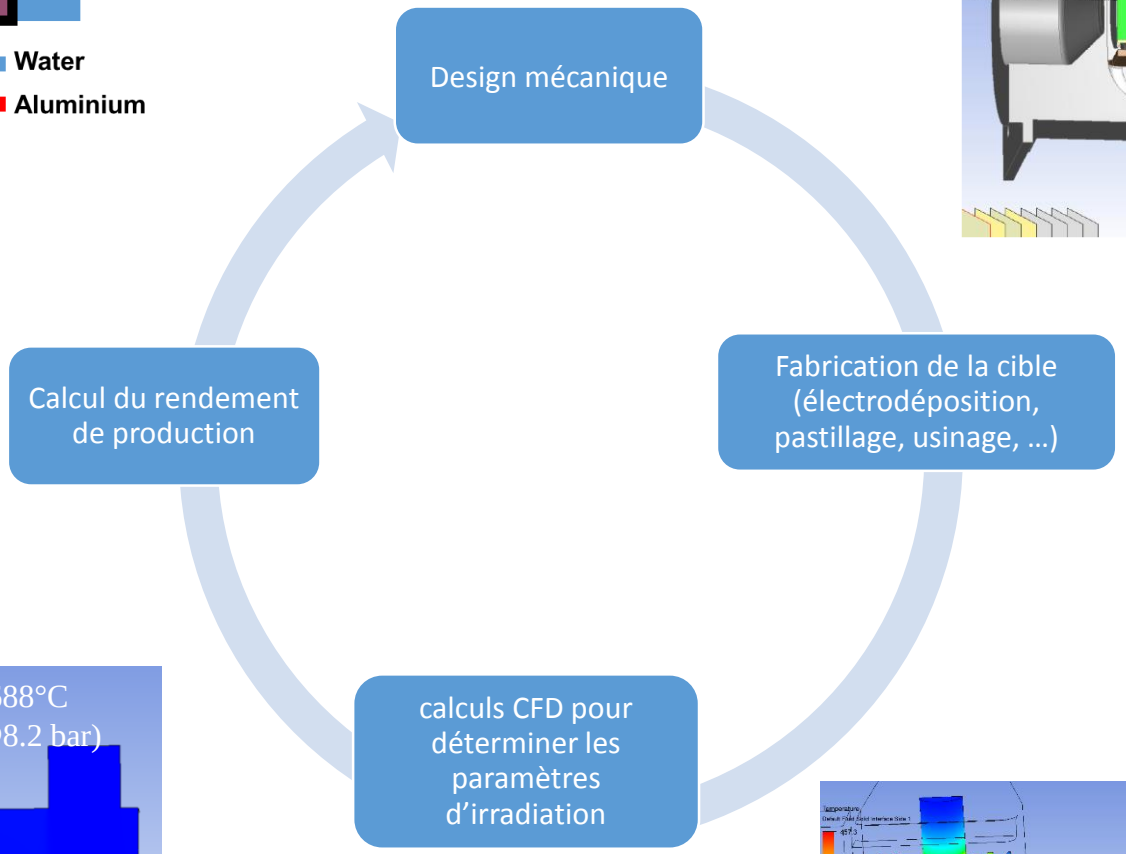
→ Application à l'activation de nanoparticules pour la curiethérapie

Cas de la production de strontium-82

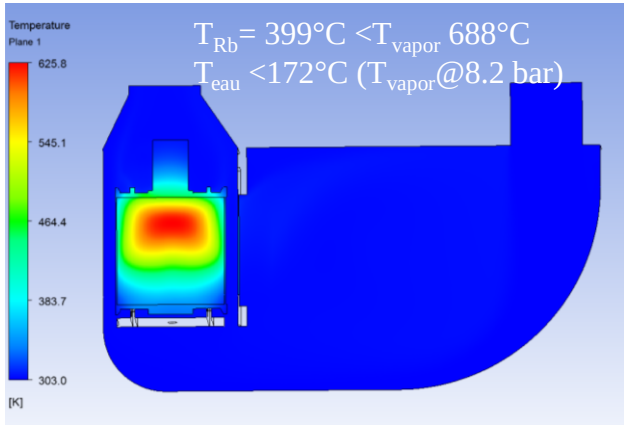


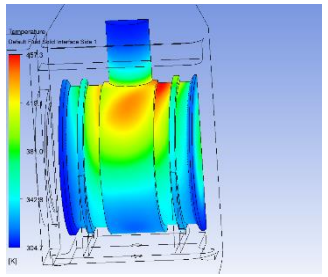


140 µA, 70 MeV
Sur cible en routine



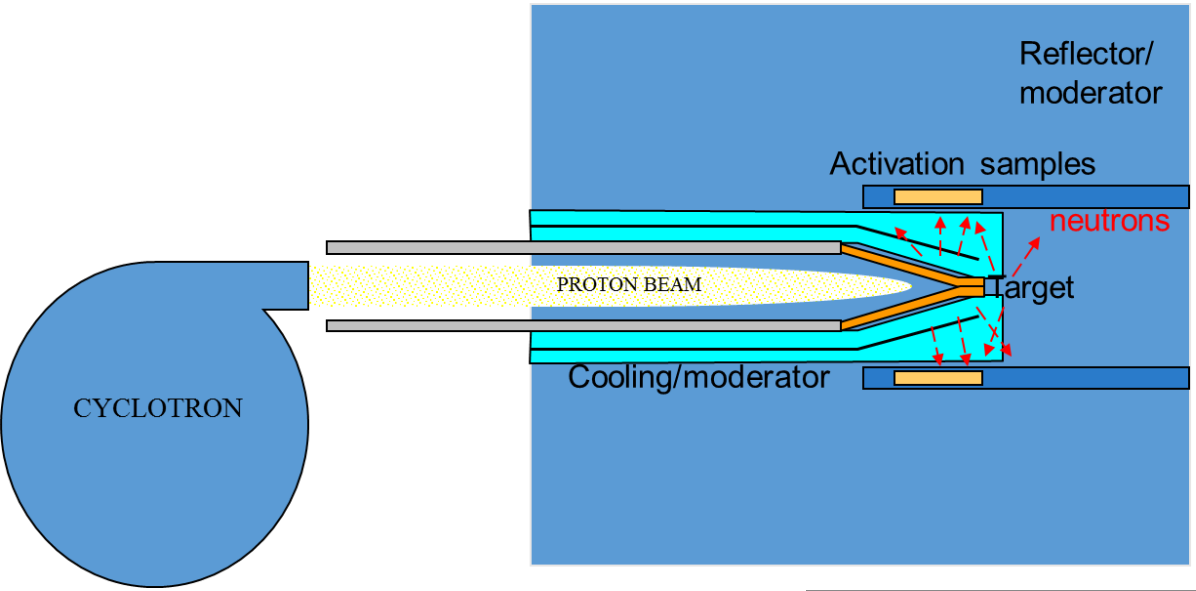






Cas de la production de neutrons secondaires (AAA / GIP Arronax/ Subatech)

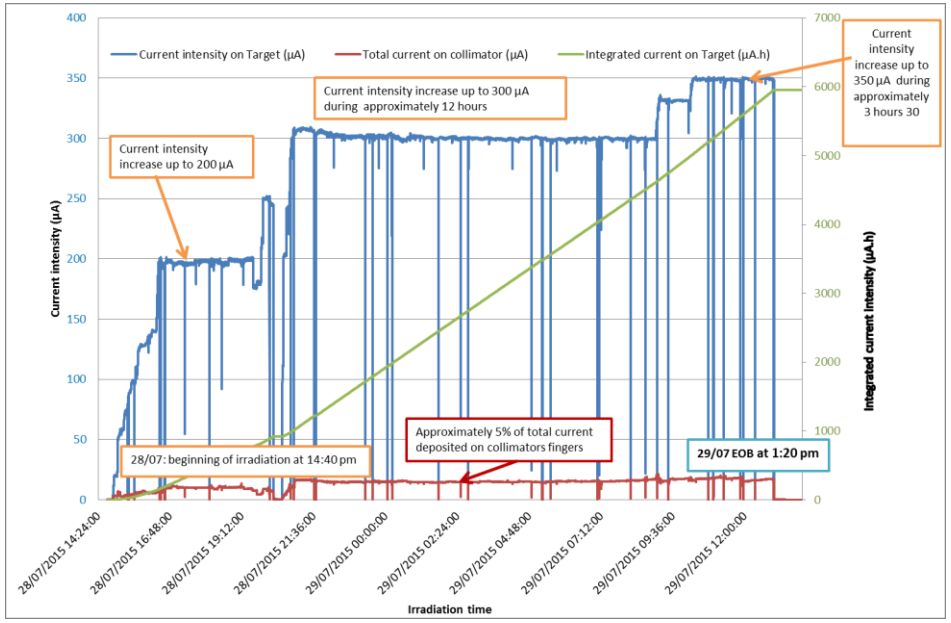
TheraneaM project







350 µA sur cible / proton 70 MeV / diamètre faisceau 30 mm



~10^{11} n/s/cm^2

Dose clinique obtenue en 6-14 h d'irradiation selon la teneur en ^{166}Ho des nanoparticules

Deux exemples sur Arronax

Design d'une cible de production de strontium-82

→ Production du rubidium-82 utilisé en imagerie cardiaque

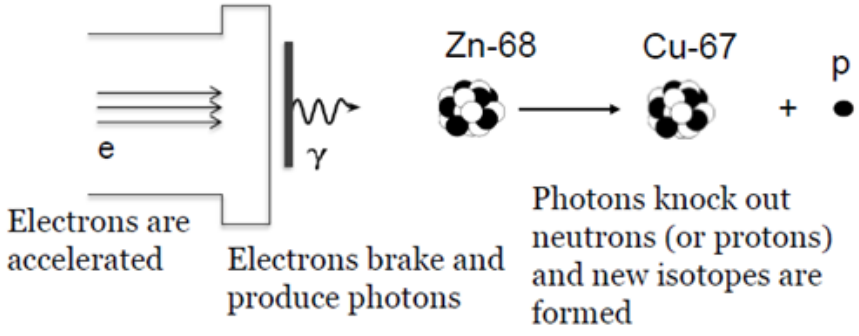
Réalisation d'une cibles de neutrons secondaires:

→ Application à l'activation de nanoparticules pour la curiethérapie

TheraneaM project

De nouvelles applications apparaissent: photoproduction

Les intensités max des accélérateurs augmentent (LINAC)



La cible reste le point bloquant sur la production

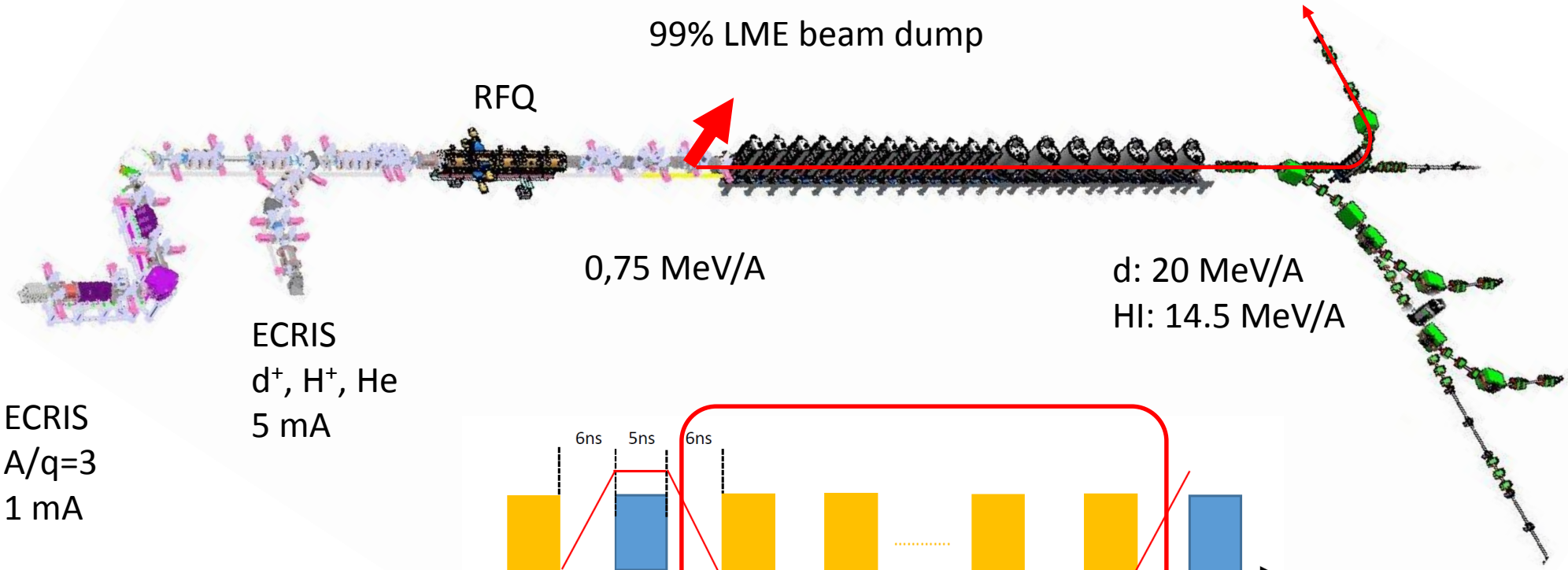
De part ses caractéristiques, SPIRAL2 pourrait être au cœur des développements sur les cibles de haute puissance

SPIRAL2 Phase 1: situation actuelle

1% to NFS (80% of ToF expt)

99% LME beam dump

RFQ



0,75 MeV/A

d: 20 MeV/A
HI: 14.5 MeV/A

ECRIS
d^+, H^+, He
5 mA

ECRIS
A/q=3
1 mA

Des opportunités multipliées pour SPIRAL2?

- Peut on « récupérer » ce faisceau perdu?
- Si une solution existe: SPIRAL2 devient une véritable facilité multiutilisateurs

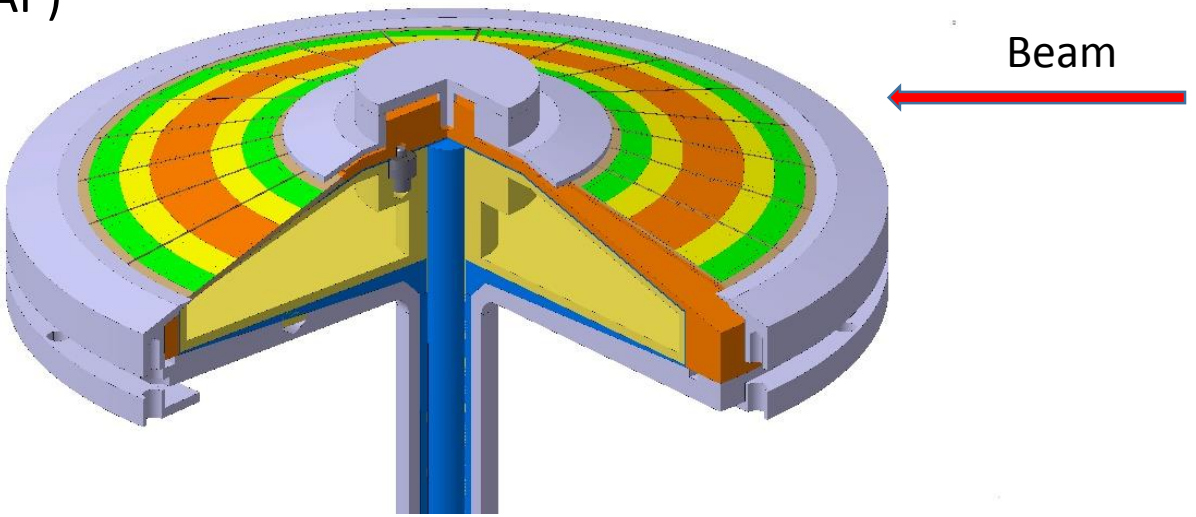
Quoi qu'il en soit: gros potentiel pour un programme de physique:

- Physique nucléaire
- Radioéléments innovants
- Physique des matériaux
- AB-NCT
- Recherche industrielle?
- …

Radioéléments innovants: cible haute puissance

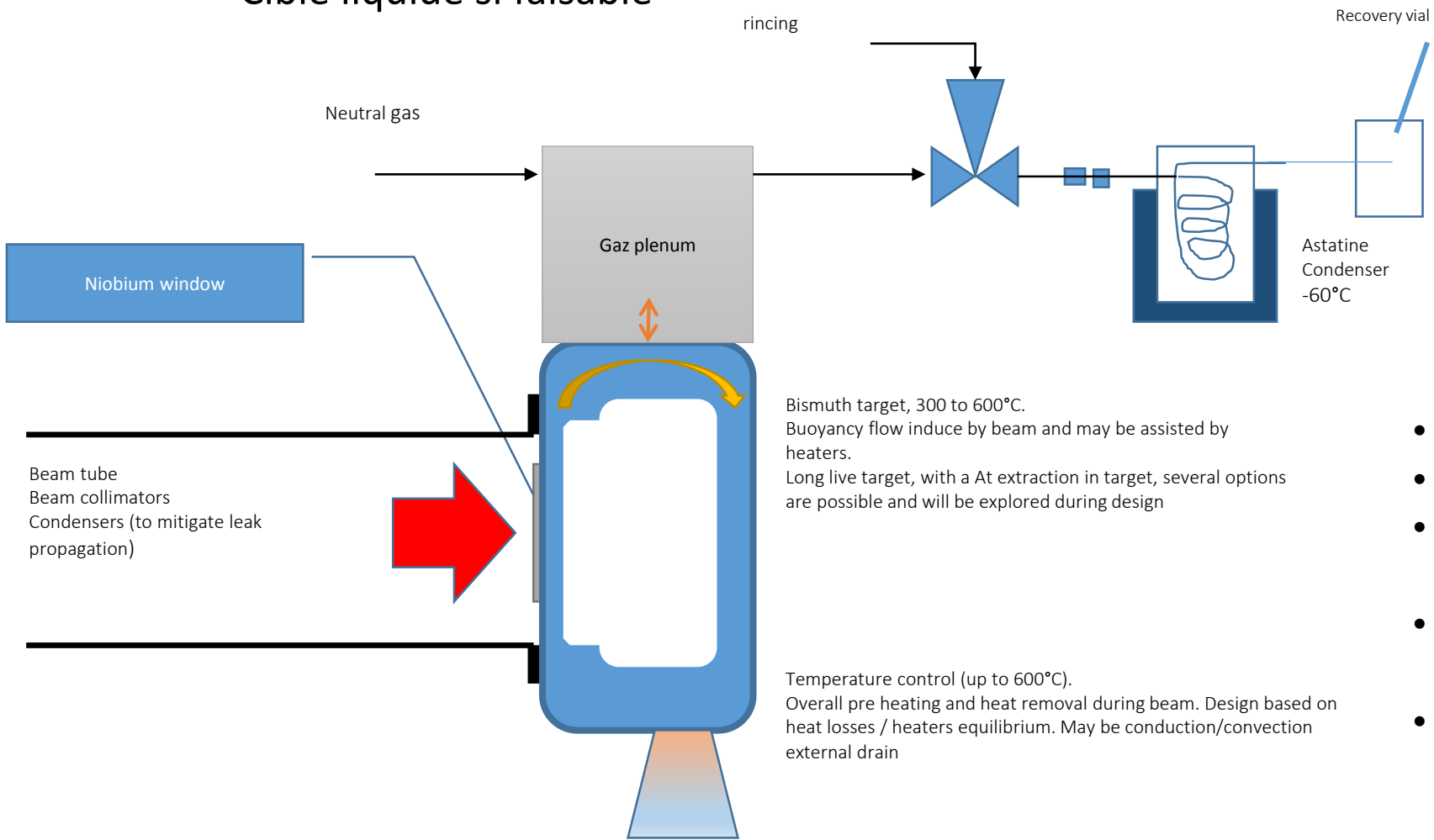
- Stations haute puissance irradiation R&D radioéléments innovants (ANR REPARE):
  - Modélisations/simulations (physique de l'interaction, sections efficaces, thermo mécanique, moyens de refroidissement)-MCNPX, FLUKA, GEANT4
  - Cible rotative solide 10 kW
  - Générateur Rn/At (faisceau Li)

- Extension a d'autres cibles (Gd,…)
  (EU starting community PRISMAS MAP)



Radioéléments innovants: cible haute puissance

- Stations haute puissance irradiation R&D radioéléments innovants (ANR REPARE):
  - Cible liquide si faisable



- Extraction en/hors ligne?
- Convection naturelle/forcée?
- Confinement statique/dynamique?

- Bi ou LBE?

- Safety in INB

Une source de neutrons compact à SP2?

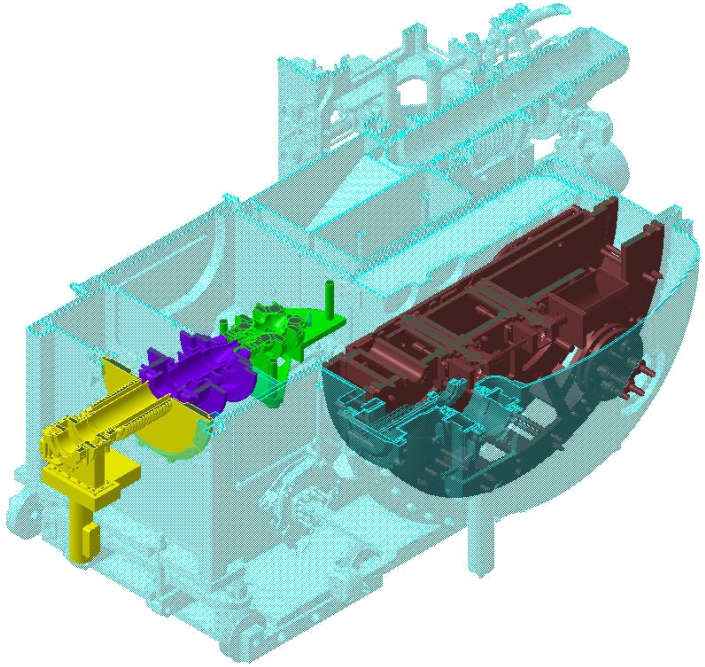
- Une forte demande (réacteurs mis a l'arrêt: délai mise en service nouvelles facilités)
- Une idée ancienne: Premières source (~1970): photofission (faisceau d'e^-): Harwell (US), HUNS (Japon), Bariloche (Argentine)

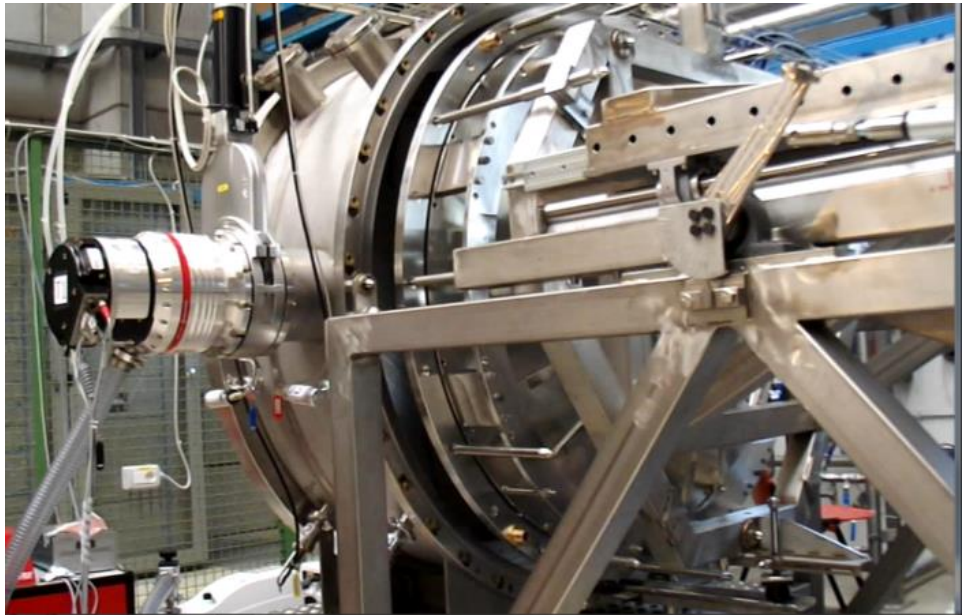
=> De nombreux projets…

- Progrès accélérateurs; courants↗↗ (100 mA p) ➔ nombreux projets à l'étude:
  - Japon: RANS@RIKEN, iBNCT, NUANS@Nagoya ~finalisés. QUANS, THUANS, UTYANS, OUANS…
  - Chine: CPHS@Beijing, PKUNIFTY
  - USA: LENS, CANS auprès de SNS
  - SARAF (pour remplacer le réacteur SOREQ) ~ SPIRAL2
  - Europe: ESS-Bilbao, HBS et NOVA-ERA Julich, SONATE CEA, LENOS@LNL, LvB Budapest,…

Une source de neutrons compact à SP2?

- Strong request (shutdown of research reactors)
- Neutron source using the SP2 converter
  - Designed for SP2 Phase2
  - 40 MeV; 5 mA d (200 kW)/proto 50 kW (1.25 mA)
  - Non reactor based





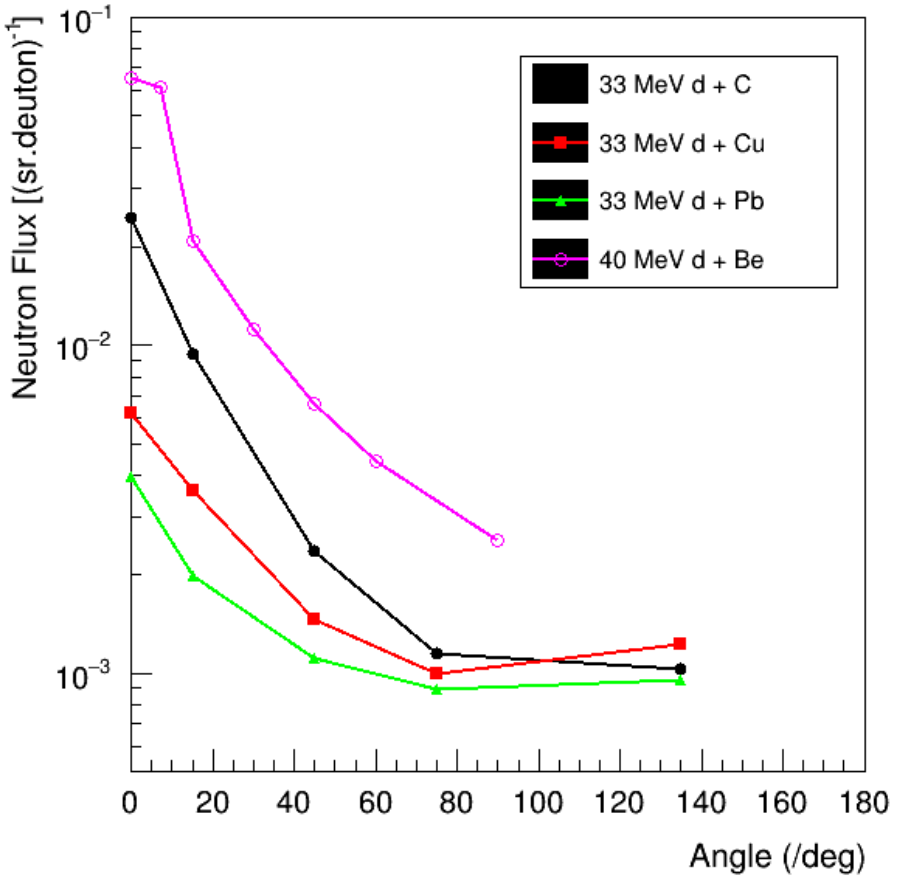


Une source de neutrons compact à SP2?

Neutron converter

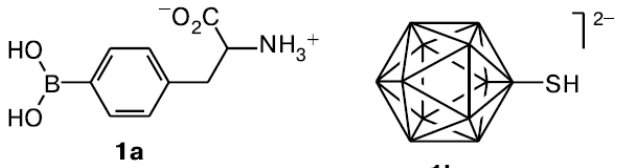
- 10^{14} n/sr/s/mA @0°.
- Rotating C wheel (400-600 turns/min)
- Working temperature up to 1850 °C
- Radiation cooling 50 kW (tested)
- Focusing ~1pi forward angles

- Radioelements
- Neutron irradiation
- Neutron radiography
- Material science



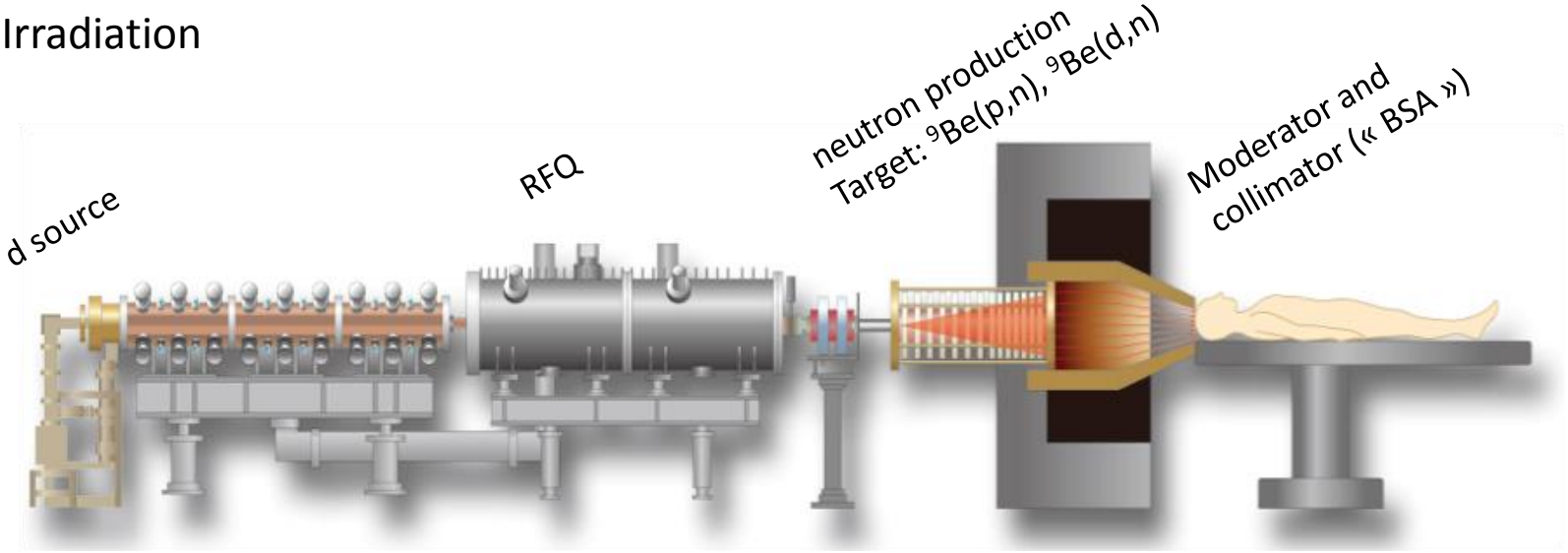
AB-NCT

BPA (*p*-borophenylalanine) and BSH (disodium mercaptoundecahydrododecaborate $Na_2[B_{12}H_{11}SH]$)



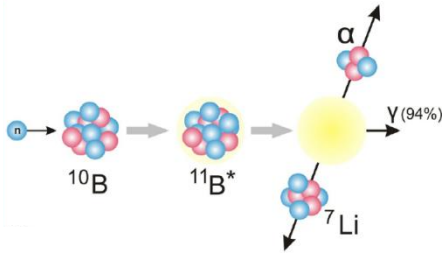
1. Injection of BNCT agent targeting specifically tumour cells

2. Irradiation



Epithermal neutrons
0.4 eV – 10 keV

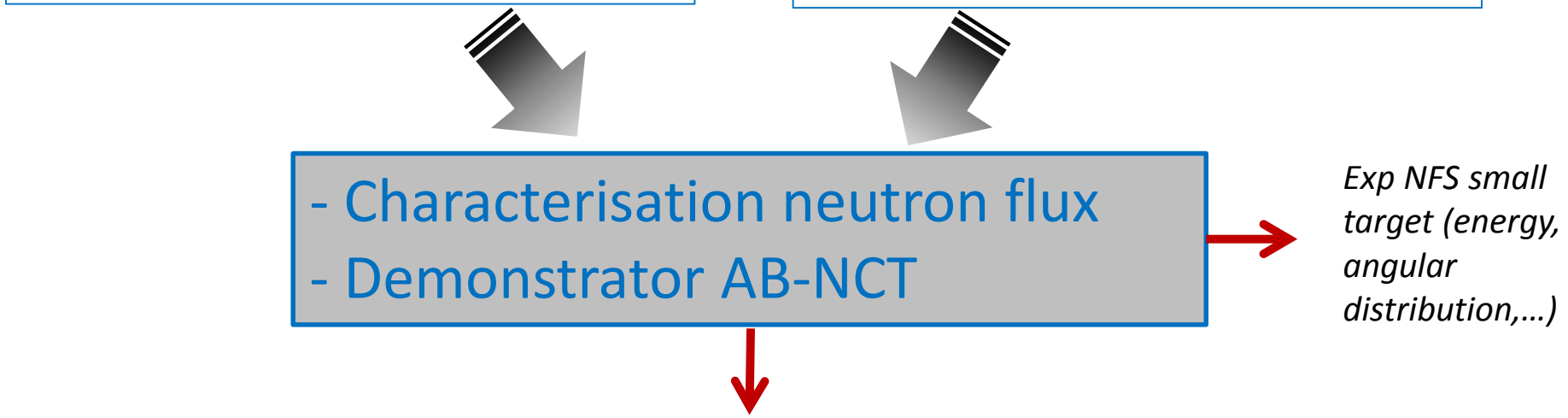
Thermal neutrons :
10^9 n/(cm^2 s)
(tumour site)



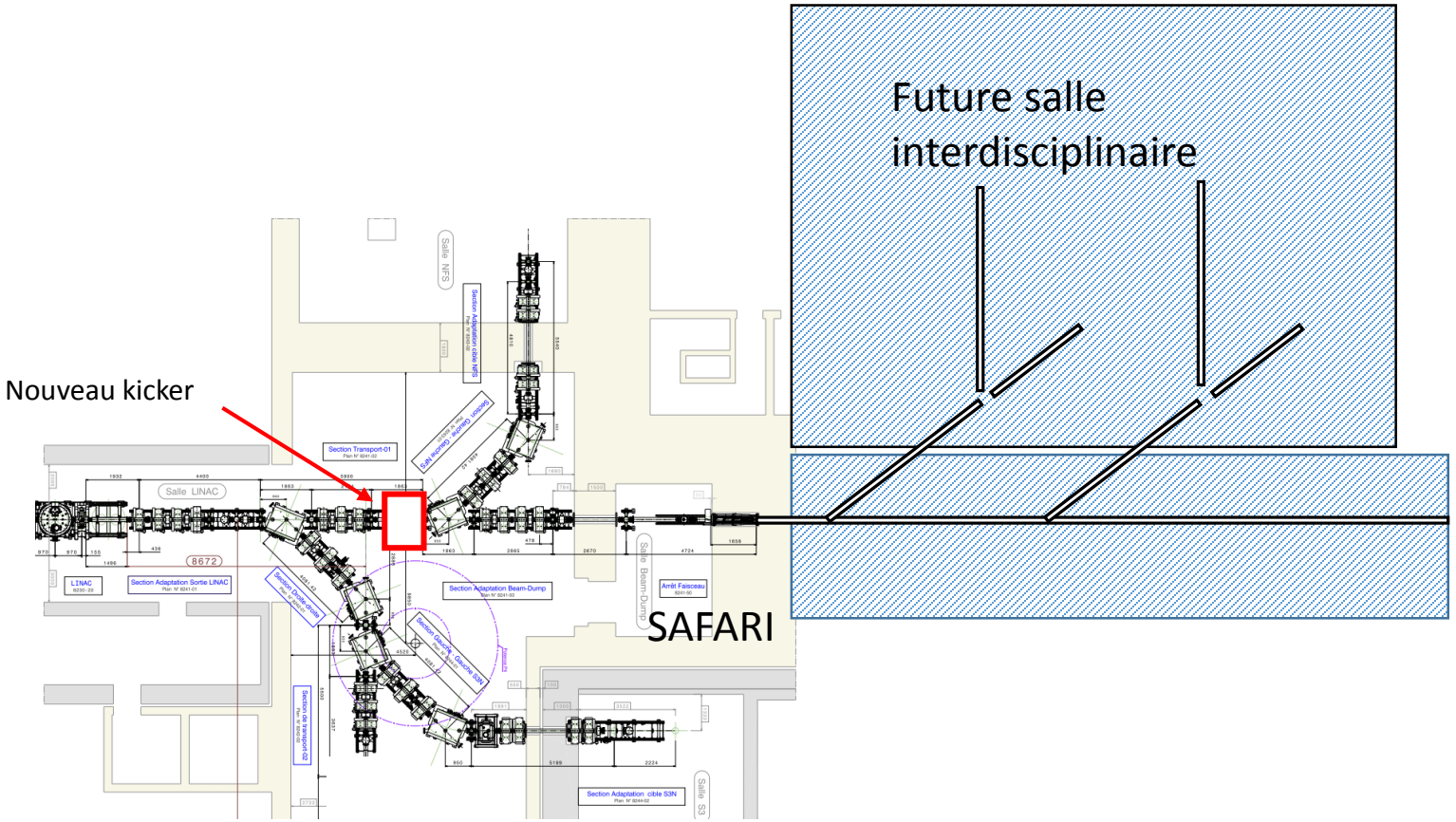
AB-NCT@SPIRAL2?

- GANIL:
  - High intensity d beam
  - RFQ 1.45 MeV
  - NFS

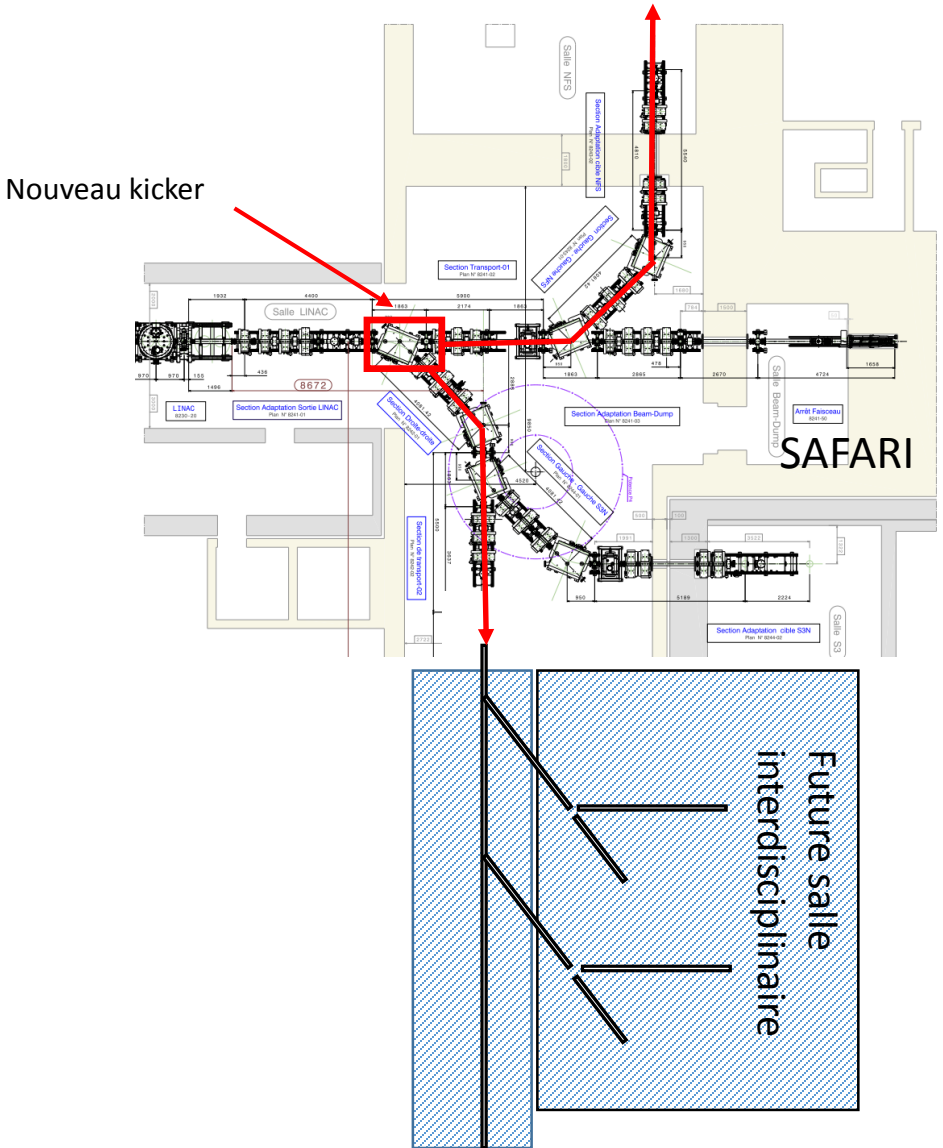
- LPSC/CEA-LETI:
  - Rotating Be target
  - Moderator (BSA)
  - Low energy neutrons detectors MIMAC
  - Gamma-camera



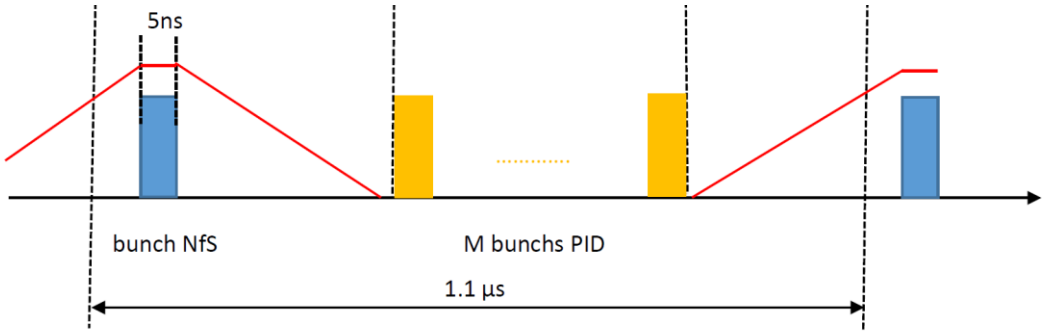
Des opportunités multipliées pour SPIRAL2



Des opportunités multipliées pour SPIRAL2



- Structure en temps sélecteur de paquets en LME



- Kicker+déviateur en LHE
- Pas 99% mais 60% de la puissance « récupérée »
- Probablement plus simple côté LHE (voir sûreté)

Conclusions

- SPIRAL2: véritable facilité multiutilisateurs si nouveau sélecteur de paquets/kicker possible
- Extension significative du programme scientifique de SPIRAL2 Phase 1
  - Utilisation faisceaux LINAC/Physique nucléaire haute intensité
  - R&D radioéléments innovants/développements cibles haute puissance
  - Source de neutrons compacte:
    - ✓ Science des matériaux/physique du solide. Discussions en cours avec CIMAP.
    - ✓ Radiographie neutrons
    - ✓ Radioelements
    - ✓ Irradiation neutron
    - ✓ …
  - AB-NCT; compétences françaises; modèle démonstrateur pour hôpital?
  - …

Source de neutrons: les besoins de la communauté française

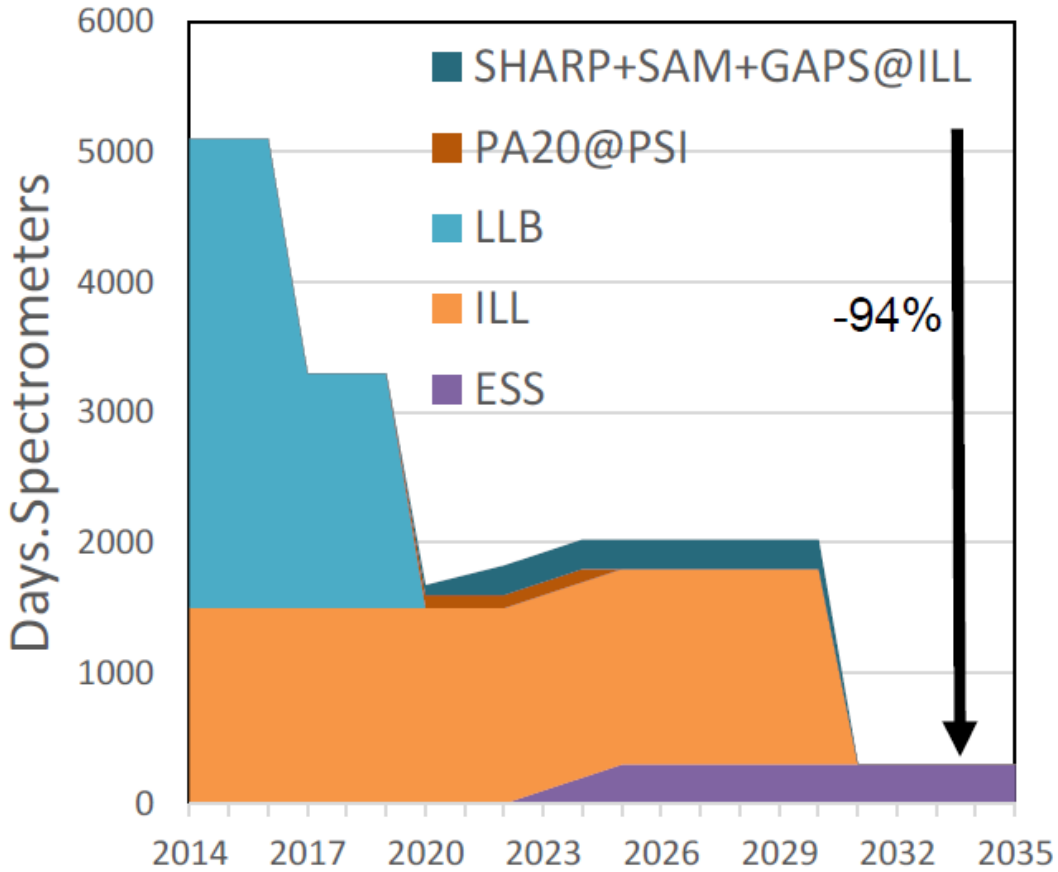


Figure 2: Temps de neutron disponible pour la communauté Française sur la période 2015-2035. Si aucune action n'est entreprise, la communauté de diffusion neutronique perdra 94% de son accès à du temps de faisceau.

Source: une source de diffusion neutronique alternative en France pour la prochaine décennie? (HAL-CEA)