

Source de neutrons pour les maquettes de réacteurs nucléaires pilotés par accélérateurs

M. BAYLAC (LPSC)

A. Billebaud, F. Bouly, E. Labussière (LPSC), L. Perrot (IJCLab)

Atelier Accélérateurs, Recherche et Société

LPSC, Grenoble, 25-27 mars 2026

- Début des années 1990, recherche de solutions pour la gestion des déchets nucléaires :
 - **axe séparation / transmutation (loi Bataille de 1991)**
 - recherche de méthodes « innovantes » pour la transmutation des noyaux à vie longue

- En même temps, remise au jour par C. Rubbia (CERN) d'un concept ancien, *Accelerator Driven System* (ADS) : réacteur sous-critique piloté par une cible de spallation alimentée par un accélérateur de particules
 - Mise en évidence des qualités du concept pour la production d'énergie et la transmutation
 - ➔ *expériences FEAT et TARC sur le PS du CERN (1995-1997)*
 - Efforts de recherche pour démontrer la faisabilité des points clés du système
 - Appels à projets dédiés dans EURATOM (FP5 à FP7, H2020)

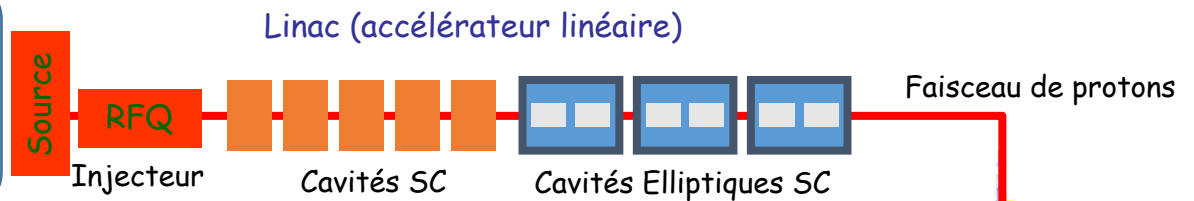
- Implication du CNRS, en particulier l'IN2P3 dès le milieu des années 1990 (réacteur, données, matériaux, accélérateur...)

- Réacteur sous-critique piloté par accélérateur (Accelerator Driven System)

Couplage de 3 éléments: **accélérateur de protons** + **cible de spallation** = « **source externe** » de neutrons
+ un cœur **sous-critique**

Accélérateur

- pour quantité optimale de **neutrons sources**: cible de plomb et **protons** incidents ~ **1 GeV**
- **accélérateur linéaire** (LINAC) privilégié (plus de souplesse dans l'ajustement de l'énergie)

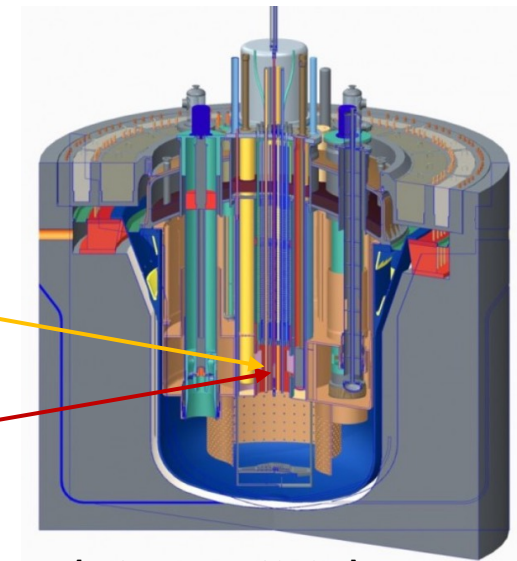


Cible de spallation

- **métal lourd** pour maximiser la production de neutrons
- refroidie pour évacuer la chaleur déposée par le faisceau et la spallation (**cible liquide**)
- **au centre du massif combustible** pour optimiser le couplage
- séparée physiquement de l'accélérateur (par fenêtre ou autre)

Cœur sous-critique

- Cœur sous-critique à neutrons **rapides**, donc refroidi par un fluide qui ne ralentit pas les neutrons (**métal liquide**)



[Projet MYRRHA-SCK CEN]

➔ **Transmutation à l'œuvre dans le réacteur
(quelle que soit la source de neutrons)**

- Principe d'un cœur sous-critique : pas de réaction en chaîne possible

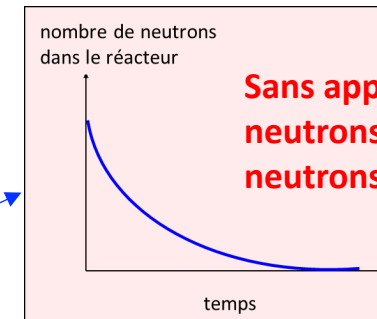
➤ Facteur de multiplication d'un cœur:

$$k_{eff} = \frac{\text{neutrons créés}}{\text{neutrons absorbés + fuites}} = \frac{\text{neutrons créés}}{\text{neutrons disparus}} = 1 \quad \text{pour un cœur critique}$$

➤ On utilise la notion de **réactivité** pour caractériser l'écart à la criticité:

$$\text{Réactivité : } \rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

ρ	Reactor	Power
> 0	Supercritical	Self-Increase
$= 0$	Critical	Self-sustained
< 0	Subcritical	Accelerator Driven



Sans apport externe de neutrons la production de neutrons s'éteint

- Puissance thermique d'un ADS:

P_{th} : Thermal power of the reactor

E_f : Energy generated per fission (~ 200 MeV)

ν : Neutrons emitted per fission (~ 2.5)

I : Proton beam current

k_{eff} : Effective neutron multiplication factor

φ^* : Source importance (~ 1.5) – characterise the efficiency of the external neutrons and thus the coupling quality (Source/Reactor).

ζ_{spal} : Spallation target neutron yield per incident proton (~ 30 , for a 1 GeV proton on LBE target)

$$P_{th}(MW_{th}) = E_f (MeV) \cdot I(A) \cdot \frac{\varphi^* \cdot k_{eff}}{1 - k_{eff}} \cdot \frac{\zeta_{spal}}{ev} \propto \frac{I}{-\rho}$$

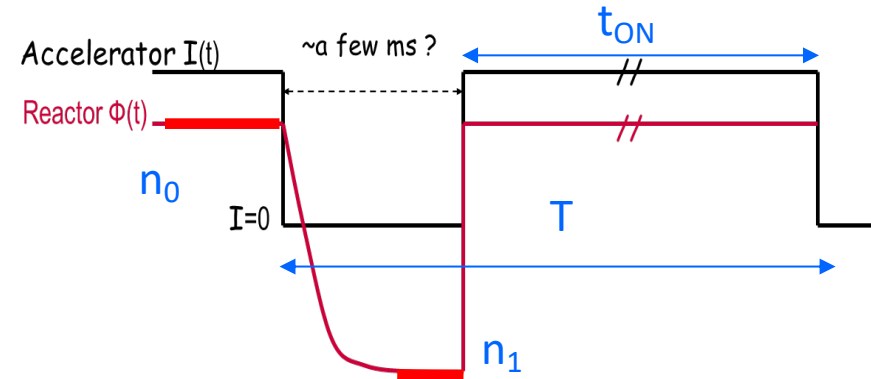
- ➔ Besoin d'injecter des neutrons en permanence pour **maintenir la puissance**
- ➔ Puissance d'un ADS dépend au premier ordre du **courant injecté** et de la **réactivité du cœur**
- ➔ **Contrôle du réacteur sans neutrons retardés, permet des combustibles tels que les actinides mineurs**

- Pour la sûreté, besoin de s'assurer que le cœur reste sous-critique en toutes circonstances :
 - monitoring absolu de la réactivité en ligne pendant l'opération impératif
- Programmes expérimentaux à l'IN2P3 dédiés à cet enjeu depuis 1996 (MUSE, EUROTRANS-IP/GUINEVERE, FREYA, MYRTE, MARISA, MYRACL, SPATIAL)
 - Besoin d'une **installation expérimentale maquette** pour étudier méthodologies de mesure, modélisation et contrôle en ligne
- Mesure de la réactivité (ρ)
 - déterminée par l'analyse de la décroissance de la population de neutrons suite à un arrêt de faisceau
 - Structure temporelle du faisceau : arrêts programmés périodiquement

$$-\frac{\rho}{\beta_{eff}} = \left(\frac{t_{on}}{T} \right) \left(\frac{n_0 - n_1}{n_1} \right)$$

ρ : réactivité

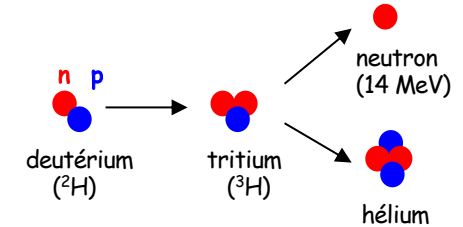
β_{eff} : fraction de neutrons retardés



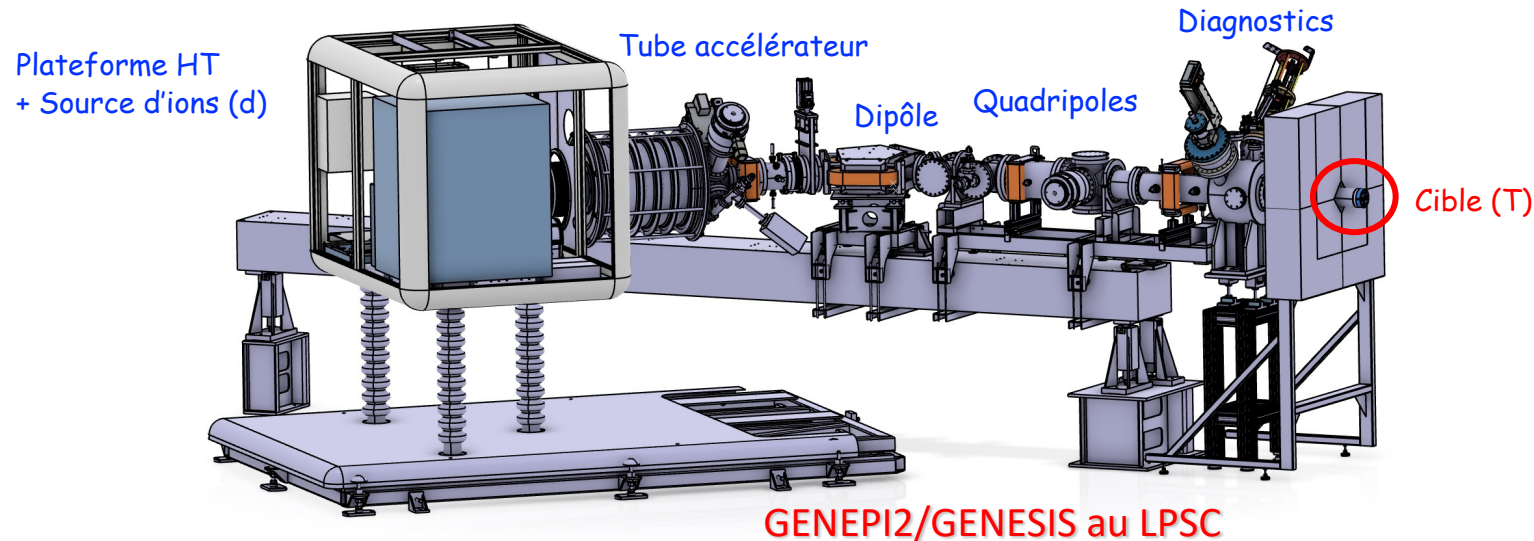
Periodically: analysis of the neutron flux decay curve
➔ measurement of absolute reactivity

Développement d'accélérateurs de basse puissance couplés à des réacteurs,
pour expérimenter la mesure en ligne de la réactivité : GENEPI

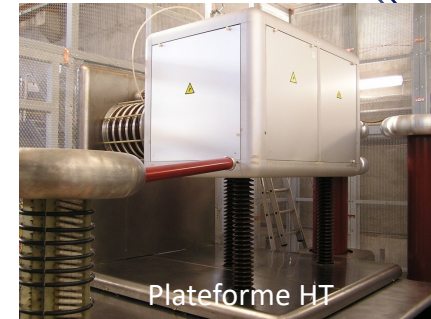
- GENEPI : Générateur de NEutrons Pulsé Intense, développé au LPSC depuis la fin des années 1990
- Accélérateur de deutons (d) électrostatique (250 keV) sur cible Tritium (T)
 - Production de **neutrons rapides** $E_n = 14.2 \text{ MeV}$ par la réaction $d + T \rightarrow n + {}^4\text{He}$
- Deux machines de type GENEPI couplées à des réacteurs
 - GENEPI1, couplé au réacteur MASURCA (CEA, Cadarache), 2000-2004
 - Premières mesures de réactivité en ligne, limites et recommandations pour les expériences futures
 - GENEPI-3C, couplé au réacteur VENUS-F (SCK-CEN, Mol/Belgique) depuis 2012
 - Exploitation 2012-2019
 - Upgrade de l'installation (projet SPATIAL) lancé depuis 2021



+ une machine locale (GENEPI2/GENESIS) de production de neutrons → voir poster S. Rey

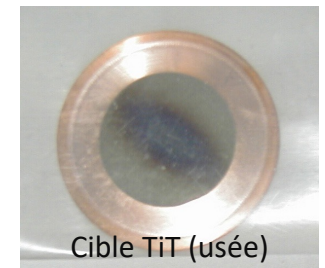


- Accélération électrostatique : plateforme haute tension (250 kV)
- Ligne de transport simple : quadripôles électriques, dipôle et correcteurs magnétiques



Plateforme HT

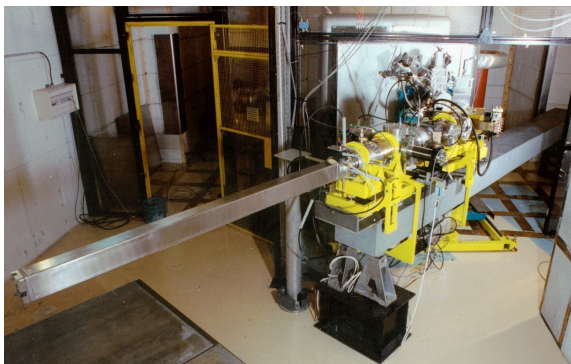
- Source d'ions deuterium
 - Intensité : 1 - 50 mA pour garantir les flux de neutrons nécessaires
 - Structure temporelle : faisceau pulsé ou faisceau continu avec interruptions programmées
- Cible de production de neutrons : T (14 MeV) ou D (2,5 MeV)
 - Dépôt de TiT (ou TiD) sur support cuivre (refroidissement, durée de vie)



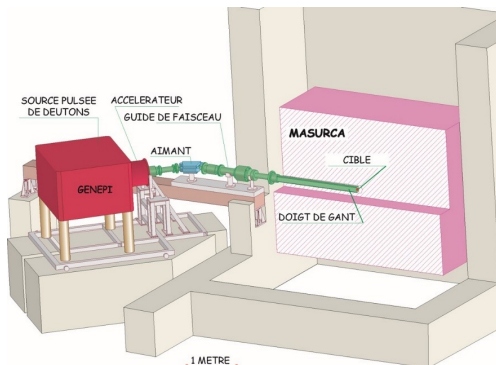
Cible TiT (usée)

- Interface avec le réacteur :
 - Contraintes liées au travail en environnement nucléaire
 - Permis de mise en route plus complexe avec un réacteur (autorités de sûreté)
 - Couplage mécanique : ligne terminale de faisceau avec la cible insérée dans le cœur du réacteur
 - ➔ **Encombrement très limité de la ligne terminale, en particulier pour le refroidissement de la cible + éléments interdits dans le cœur pour raisons de sûreté (eau, H)**
 - Fonctionnement du réacteur impose des contraintes sur les variations de puissance du faisceau sur cible
 - ➔ **Impact fort de la stabilité de l'accélérateur sur le réacteur**

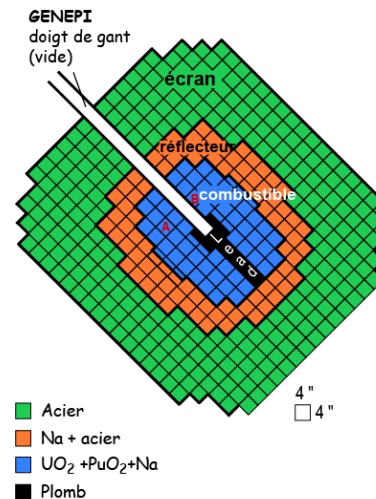
- **Programme MUSE: MULTIplication d'une Source Externe (1996-2004)**
 - Collaboration **CEA/DEN** – CNRS (1997-2004)
 - Couplage du réacteur maquette rapide MASURCA à une **source de neutrons pulsée** $T(d,n)$ ou $D(d,n)$
 - MUSE 4 : Collaboration européenne 5ème PCRD EURATOM (2000-2004)
- ➔ **construction du 1er accélérateur de neutrons GENEPI, développé par le LPSC : source pulsée intense**



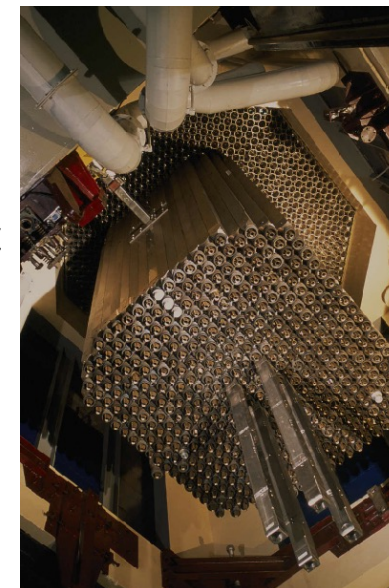
GENEPI1 en test @ LPSC



GENEPI1@MASURCA



MASURCA: bottom view

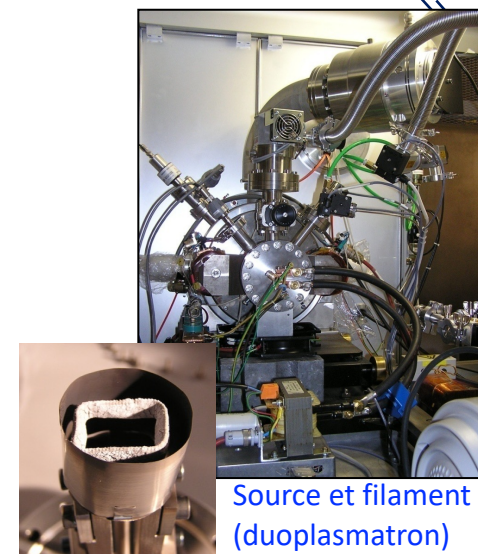
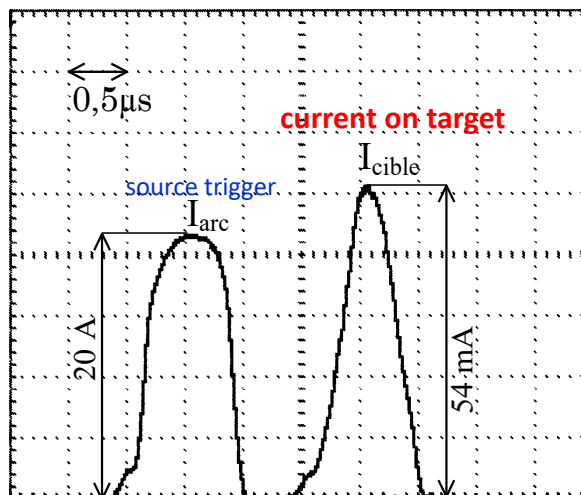


MASURCA: bottom view

1^{er} couplage au monde d'un accélérateur avec un réacteur maquette à spectre de neutrons rapides (2001)

• Accélérateur

- Source impulsionnelle de deutons
 - **duoplasmatron** (filament)
 - intensité crête: 50 mA
 - largeur de pulse: 700 ns (FWHM)
 - front de montée/descente : 100 ns
 - fréquence: 10 Hz à 5 kHz
 - intensité moyenne : 0,5 – 200 μ A
- Ligne de transport adaptée aux forts courants
- Cible : T (12 Ci) ou D
 - Cible T : 3×10^6 neutrons/impulsion
 - $P_{\text{beam}} = 50$ W à dissiper à l'air



Source et filament
(duoplasmatron)

C. Destouches et al, NIM A 562 (2006), 601-609

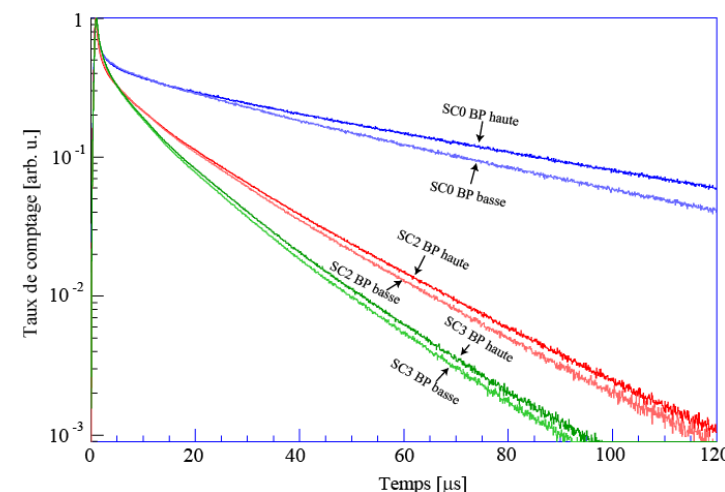
• Réacteur

- Couplage horizontal avec le réacteur
- Chambres à fission réparties dans le cœur

• Analyse de décroissance temporelle du taux de neutrons

➔ **validation de la mesure de réactivité du réacteur en ligne**

• Arrêt et démantèlement de l'accélérateur en 2005



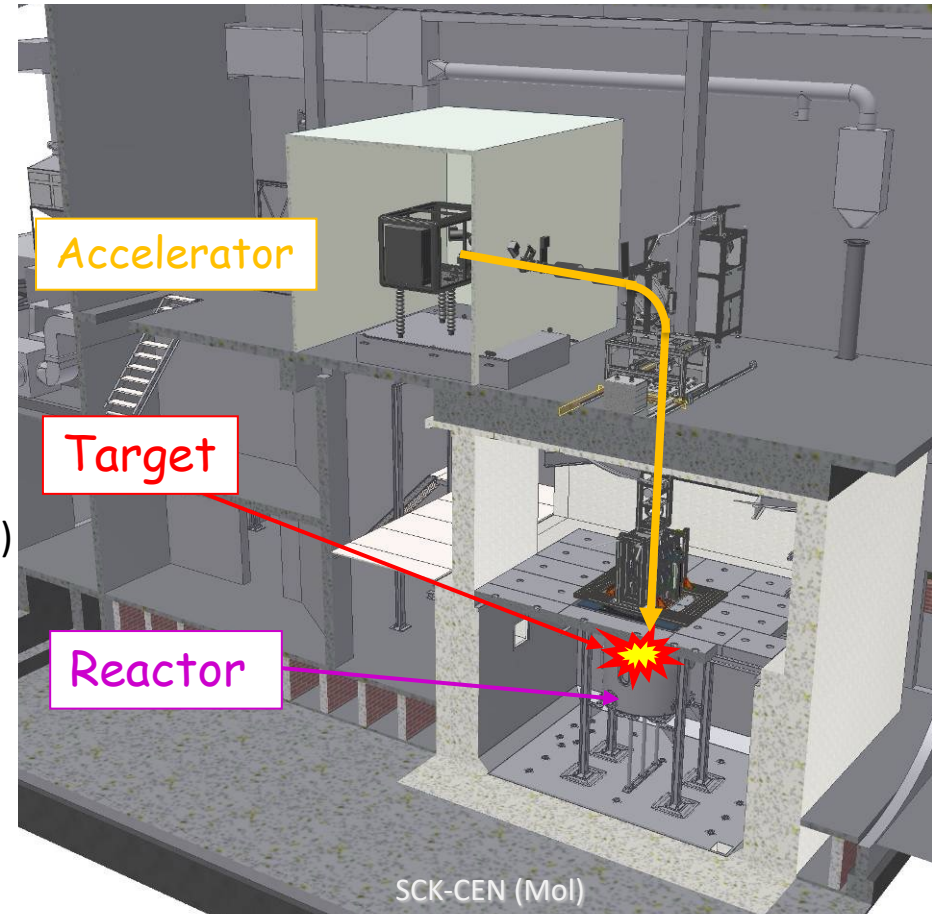
L'expérience MUSE-4 : mesure des paramètres cinétiques d'un système sous-critique (2004), J. Vollaire (thèse)

- **Programme GUINEVERE: Generator of Uninterrupted Intense Neutron at the Lead Venus Reactor (2006-2019)**
 - Collaboration européenne dont France + **SCK-CEN (Centre d'Études Nucléaires de Belgique)**
 - Couplage du réacteur maquette VENUS (SCK) à une (nouvelle) source de neutrons de type GENEPI
- **Accélérateur GENEPI-3C**
 - Conçu au LPSC et réalisé par **collaboration LPSC + LPCC + IJCLab (IPNO) + IPHC**
- **Objectif: validation des mesures de réactivité dans un cœur représentatif d'un ADS de puissance**
 - Cœur rapide au **plomb** (VENUS-F)
 - Faisceau **continu** avec des interruptions programmées (GENEPI-3C)

GUINEVERE : Generator of Uninterrupted Intense NEutrons
at the lead VENus Reactor (Mol, Belgium)

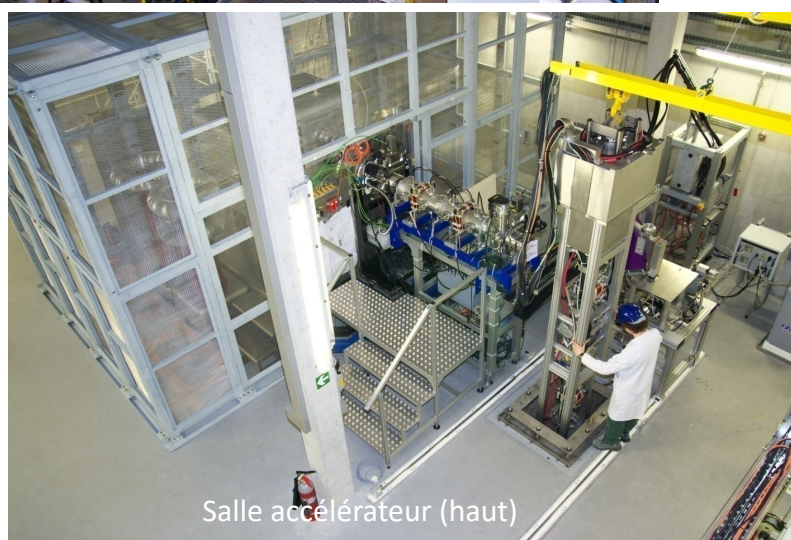
- **GENEPI-3C**
 - accélérateur électrostatique de deuteron (250 W)
 - cible de tritium dans le cœur
- **VENUS-F**
 - Réacteur rapide sous-critique à basse puissance (100 W)
 - Cœur à l'Uranium enrichi avec Pb-Bi

➔ Maquette de l'ADS de puissance MYRRHA (refroidi au Pb-Bi)



1^{er} couplage au monde d'un accélérateur avec un réacteur sous-critique rapide au plomb (2011)

- Développement (2008-2010) : 30 personnes au LPSC + labos IN2P3 IJCLab(IPNO), LPC Caen, IPHC**



✓ Pulsed mode

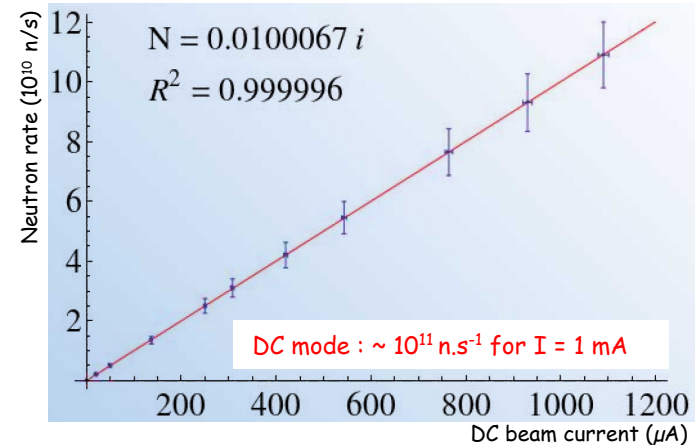
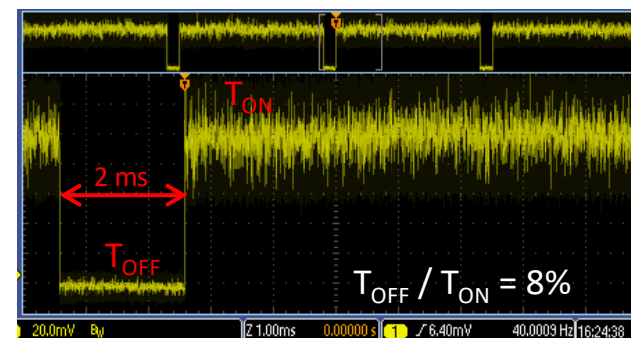
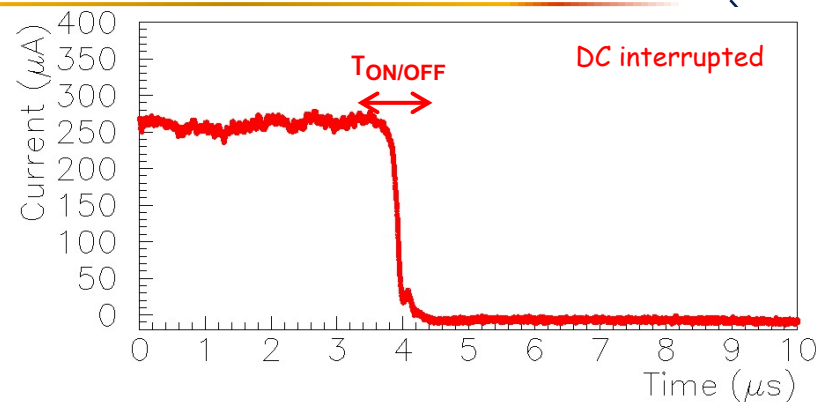
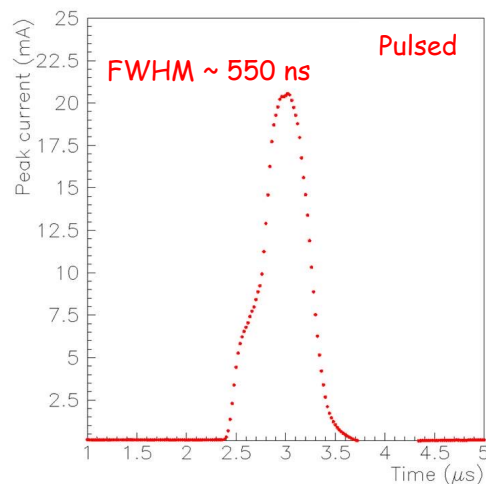
- Beam current : $I_{\text{peak}} \sim 20\text{-}25 \text{ mA}$
- Pulse width: $T_{\text{pulse}} \sim 550 \text{ ns}$ (FWHM)

✓ DC mode with interruptions

- Beam current : I_{average} up to 1 mA
- Interruption transition : $T_{\text{ON/OFF}} < 1 \mu\text{s}$
- Interruption range: $6\% < T_{\text{OFF}} / T_{\text{ON}} < 90\%$

✓ Neutron production rate

- Pulsed mode $\sim 1.15 \times 10^6 \text{ n /pulse}$
- DC mode $\sim 10^{11} \text{ n.s}^{-1}.\text{mA}^{-1}$ for $I = 0.1 - 1 \text{ mA}$



✓ Pulsed mode

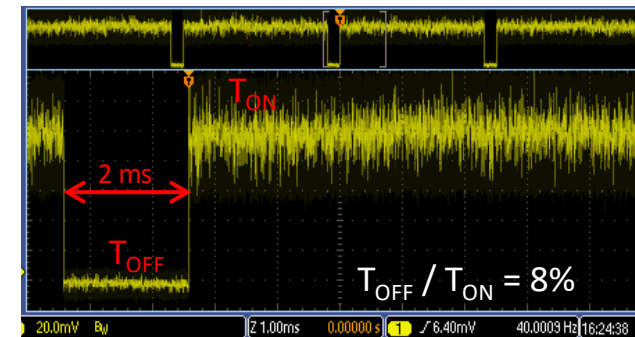
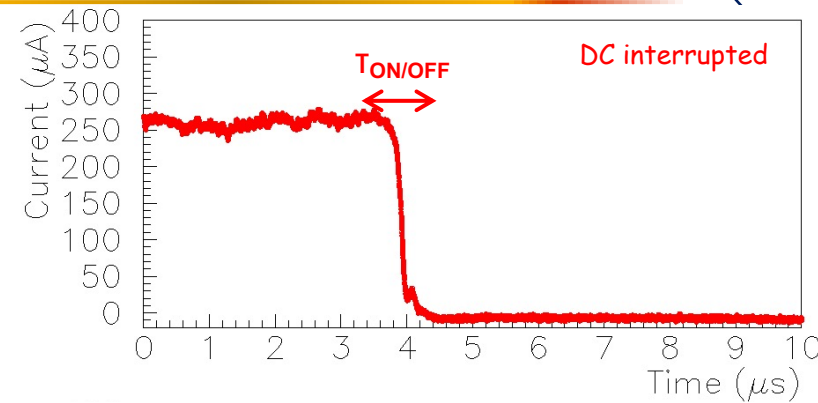
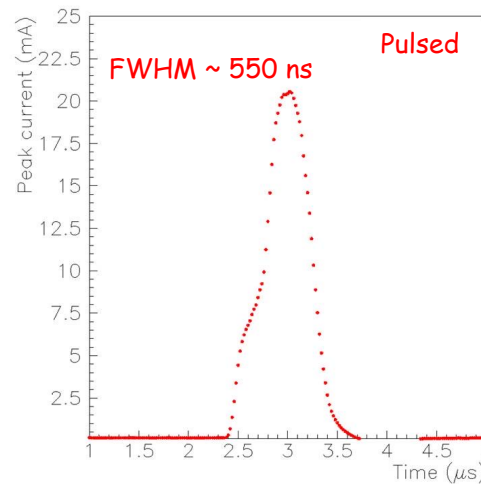
- Beam current : $I_{\text{peak}} \sim 20\text{-}25 \text{ mA}$
- Pulse width: $T_{\text{pulse}} \sim 550 \text{ ns}$ (FWHM)

✓ DC mode with interruptions

- Beam current : I_{average} up to 1 mA
- Interruption transition : $T_{\text{ON/OFF}} < 1 \mu\text{s}$
- Interruption range: $6\% < T_{\text{OFF}} / T_{\text{ON}} < 90\%$

✓ Neutron production rate

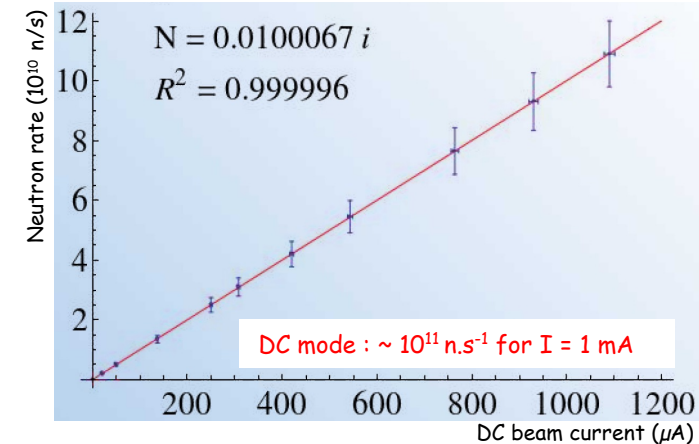
- Pulsed mode $\sim 1.15 \times 10^6 \text{ n /pulse}$
- DC mode $\sim 10^{11} \text{ n.s}^{-1}.\text{mA}^{-1}$ for $I = 0.1 - 1 \text{ mA}$



Operational feedback : ADS availability versus beam reliability

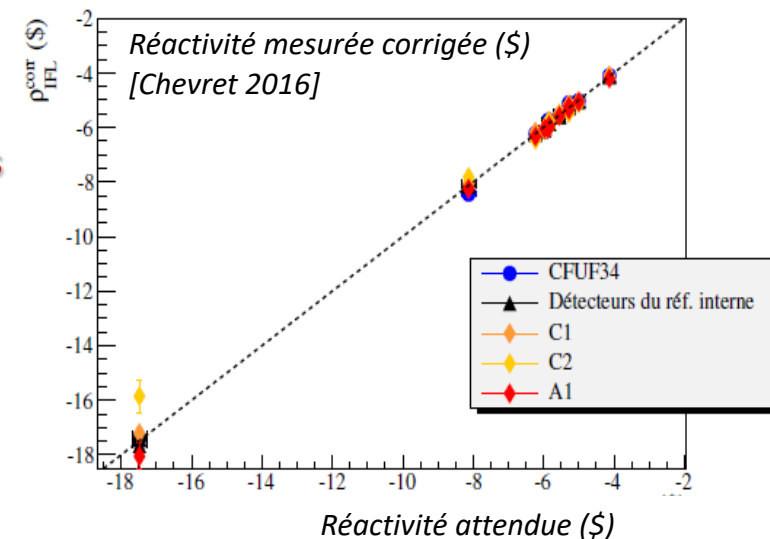
- After some accidental trips (DC mode), beam comes back on target suddenly
- ➔ fast increase of neutron rate in the core
- ➔ safety system of the reactor triggers a reactor shutdown (SCRAM)
- ➔ all reactor rods drop (safety and controls)
- ➔ Full reactor restart procedure needed (30 min)

Machine reliability is key to operate an ADS

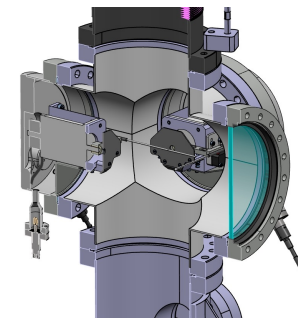


- De 1998 à 2019 les sources GENEPI ont permis d'établir des **conditions expérimentales uniques** pour conduire les programmes de recherche sur les ADS à l'échelle européenne
- Elles ont permis des avancées majeures mesurer la réactivité et **proposer une méthode de référence pour le monitoring de la réactivité d'un ADS**:
 - Mesure relative en courant continu (Marie et al.)
 - Mesure absolue lors d'interruptions brèves de faisceau** (Chevret et al.)
 - Mise en évidence des **effets spatio-énergétiques** et proposition d'un protocole pour prendre en compte et s'affranchir de ces effets (Chevret et al., Bailly et al. Lecouey et al.)
- Etape suivante 2022-2028 (ultime !)**:
 - Généralisation de la méthodologie et quantification des biais**
 - Transposition à un système de puissance**

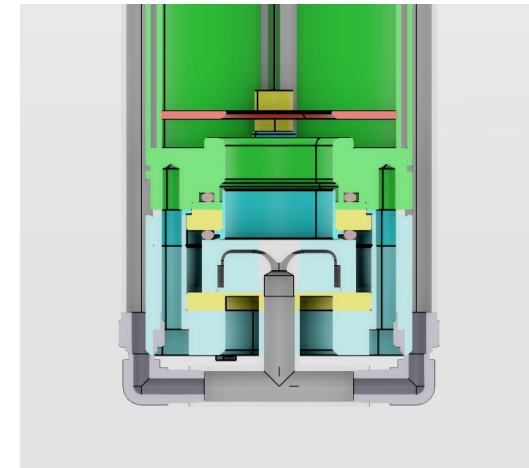
➔ **Nouveau projet SPATIAL**



- Programme **SPATIAL** (**S**ystème **P**iloté par **A**ccélérateur pour la **T**ransmutation et la réduction des stock**A**ges**g**éo**L**ogiques) : extension de performances de GUINEVERE (2022-2026)
 - Collaboration LPSC, LPPC, IJCLab + SCK-CEN pour étudier les effets spatiaux-énergétiques
- **Upgrade de GENEPI-3C : augmentation de l'intensité et de fiabilité du faisceau**
 - **Source ECR (electron cyclotron resonance)**
 - $I = 3 \text{ mA}$ sur cible (4 mA sortie de source)
 - **Chopper (hacheur de faisceau) rapide**
 - Interruptions $T_{\text{ON/OFF}} < 1 \mu\text{s}$
 - **Refroidissement de cible**
 - $P_{\text{beam}} = 750 \text{ W}$
 - **Diagnostics**
 - Courant et profil
 - Mise à jour du système de contrôle-commande



Diagnostics à fil tournant



Cible refroidie

- Développements effectués, installation en cours à Mol depuis Mars

- Source d'ions ECR 5,8 GHz**

- Développée par le LPSC
 - similaire à GENEPI2 (4 mA protons)

- Chopper rapide**

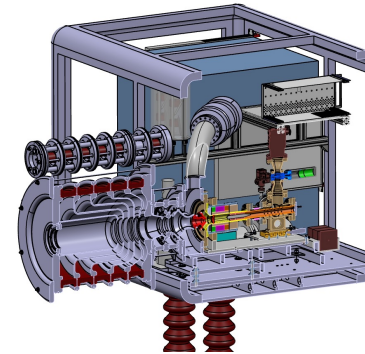
- Développé par le LPSC
 - $dv/dt = 50\text{kV}/1\mu\text{s}$, unipolaire, compact < 500mm

- Diagnostics**

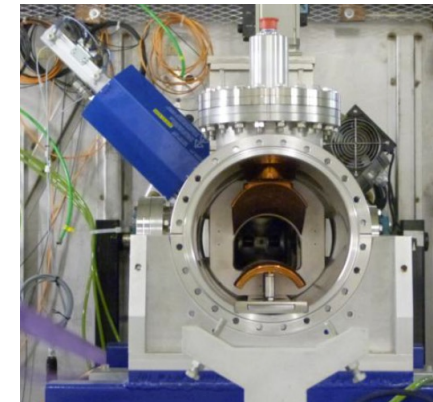
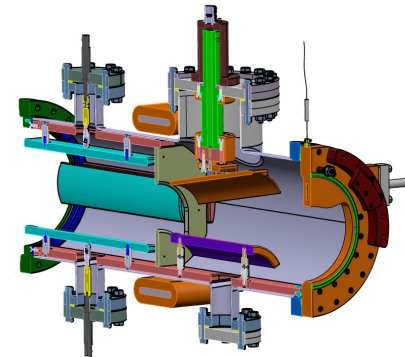
- Profil : développé par le LPSC et le LPCC
 - Courant : Faraday Cup 3kW du commerce

- Refroidissement de cible**

- Conception du système finalisée avec Galden®
(fluide thermique fluoré inerte)
 - Essais thermiques du porte-cible menés sur faisceau test
 - Tests de bullage du Galden® effectués



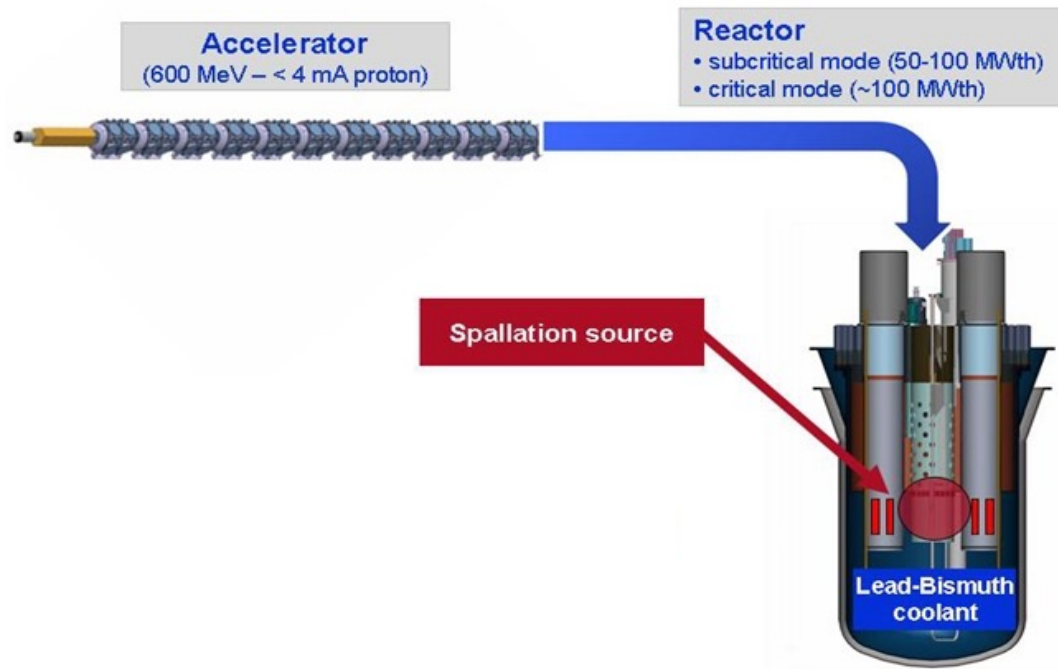
Source d'ions ECR (SuperCOMIC)



Fast chopper and dump system

- Commissioning avant l'été pour lancement du programme expérimental à l'automne

- Project of power ADS demonstrator **MYRRHA** (**M**ulti-purpose **hY**brid **R**esearch **R**eactor for **H**igh-tech **A**pplications)
 - Lead by SCK-CEN (Belgium)**
 - Transmutation study of long life and high activity nuclear waste
 - Proton Target Facility for R&D
 - Fusion Target Station for test of materials for fusion reactors
 - 600 MeV, 4 mA proton beam**



Highly-enriched MOX fuel

Pb-Bi Eutectic coolant & target

k_{eff} around 0.95 in subcritical mode

MYRRHA = 600 MeV, 4 mA proton linac + Lead Bismuth target + reactor

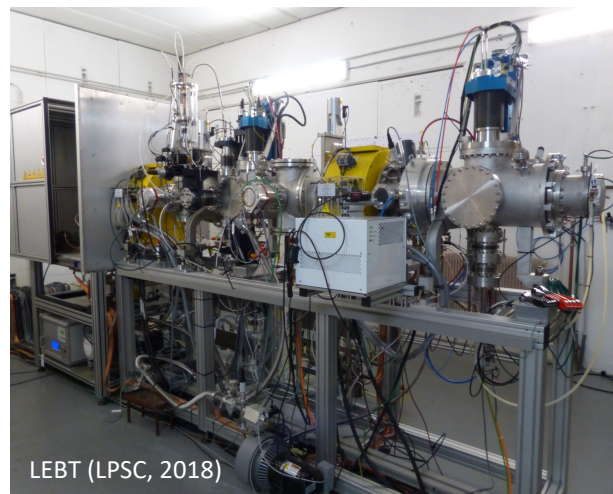
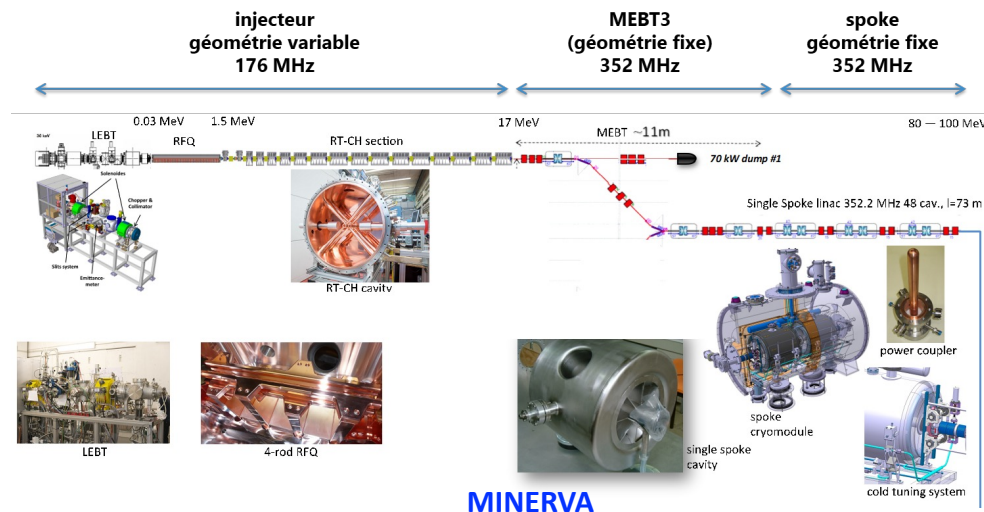
- Collaboration with CNRS through European projects and contracts since 2000's

- **Construction in 3 phases:**

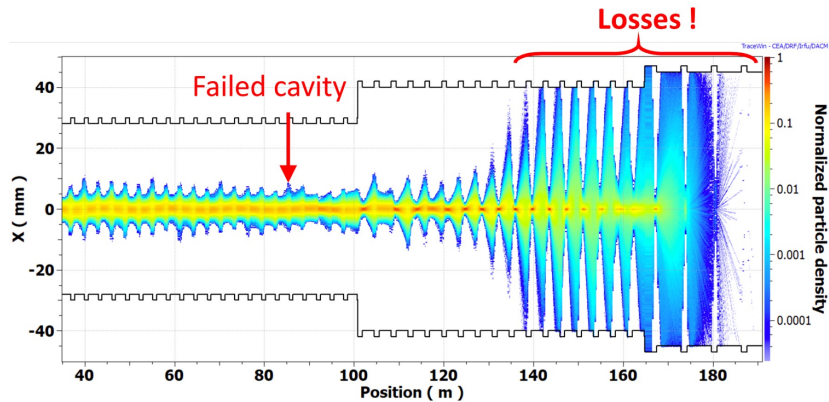
- **First linac section up to 100 MeV (MINERVA)**
- Second linac section up to 600 MeV
- Construction of the reactor

- **Contribution of CNRS/IJCLab, LPSC, IPHC)**

- Injector
 - Development of Low Energy Beam Transport line
- Linac
 - Spoke cavities
 - Cryomodule prototype
 - Couplers
- Diagnostics
 - BPM for the MEBT3
- Beam dynamics
 - Medium Energy Beam Transport (MEBT3)
 - High Energy Beam Transport (HEBT)
 - Design of the proton linac
 - **Fault-compensation studies**

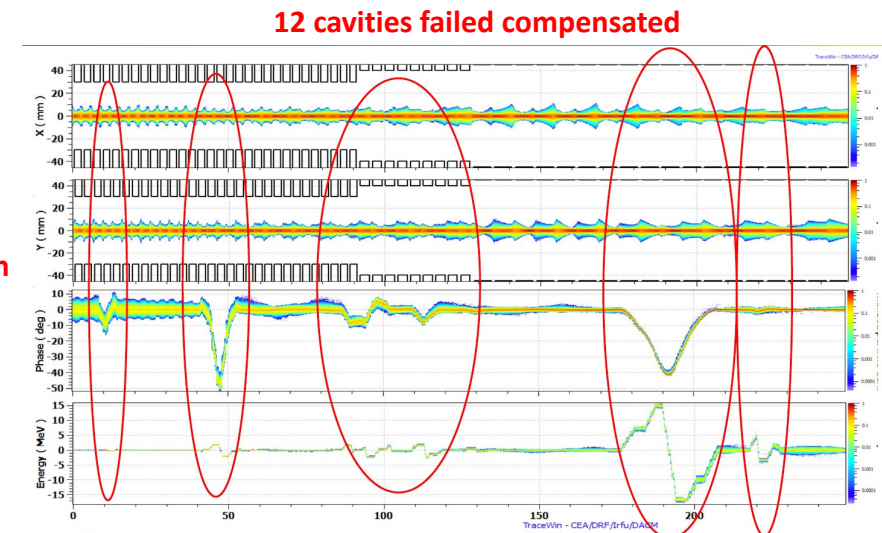


- **Reliability requirements for MYRRHA**
 - To minimize thermal stress & fatigue on target window, reactor structures & fuel assemblies
 - To ensure an 80% availability of facility : given the foreseen reactor start-up procedures (**24h to restart**)
 - ➔ **Less than 10 beam trips longer than 3 sec over 3 months of operation (or 0,1 beam trip/day)**
- **To reach such extreme reliability, specific guidelines are required in particular**
 - single failed cavity in the linac induces beam loss
 - ➔ **Fast fault-compensation scheme required to limit impact of failures**



Beam dynamics in the MYRRHA linac upon single cavity failure

Fault-compensation



Beam dynamics and beam distribution with failure compensation in the MYRRHA linac (10^6 macro-particles)

F. Bouly, Accelerator driven systems, DOI: <https://doi.org/10.23730/CYRSP-2024-003.2085>

- **Fault compensation scheme of cavities in the linac**
 - fast detection of faulty cavity (which is de-tuned)
 - re-tuning of neighbouring cavities to compensate (V, ϕ)
 - beam is restored
- **Optimization of the re-tuning time**
 - Goal : fast determination of compensation settings
 - Beam dynamics and multi-objective optimization
 - **Development of a fast automatic tool : LightWin**

➔ settings consistent with all single MINERVA cavity failures generating losses < 1 W/m

Last compensating lattice: retrieve W_{kin} and $M_{z\delta}$.



Figure 2: Scheme of the compensation strategy chosen for the MINERVA study. Green cavities are nominal. Failed cavities are in red. Orange represent retuned cavities. In yellow, the cavities that are only rephased.

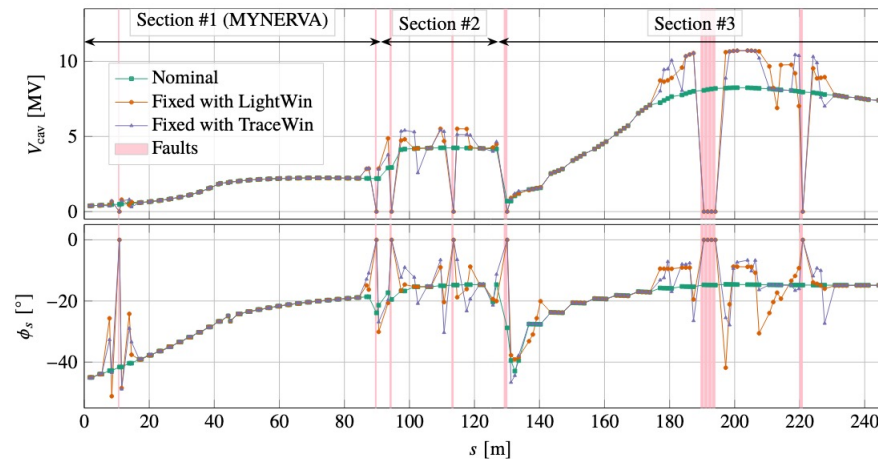


Figure 2: Accelerating voltage and synchronous phase of the cavities.

A. Plaçais et al, Cavity failure compensation strategies in superconducting linacs, doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPORI04

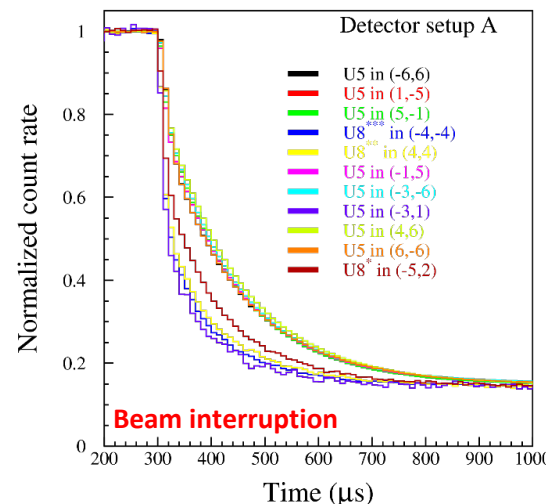
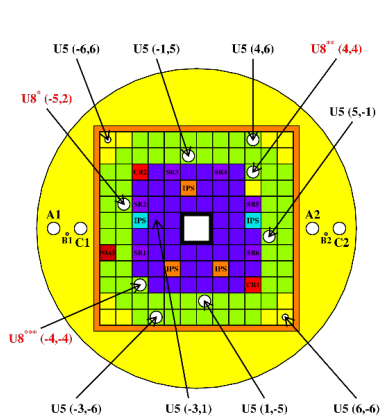
A. Plaçais et al, Automatic retuning of superconducting linacs using LightWin, doi:10.18429/JACoW-LINAC24-THXA001

- Developments of **low power accelerator-based neutron sources** at LPSC since the end of the 1990's
 - Successfull demonstrators of low-power ADS at different reactors
 - Specific requirements have driven accelerator R&D, in good synergy with reactor physics
- ADS demonstrator (tens of MWth) require **high power (multi-MW) beam**
 - Among the challenges associated to high power hadron accelerators (space charge, halo, loss)
 - Most stringent is the reliability imposed by the interface with the nuclear core
 - ➔ **Developing schemes to reach such extreme level of reliability is the key to ADS**
- **Such fault-compensation algorithms useful for ADS but also, for operating accelerators such as SPIRAL2**
 - Master Project IN2P3 : REFILL (Reliability and fast Failure compensation methods in RF superconducting Linacs)

Thanks for your attention

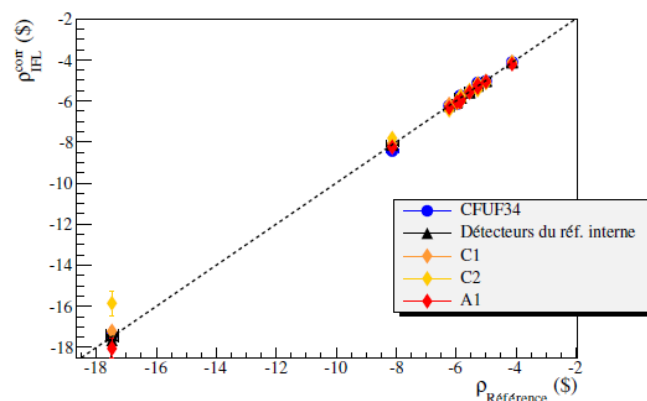
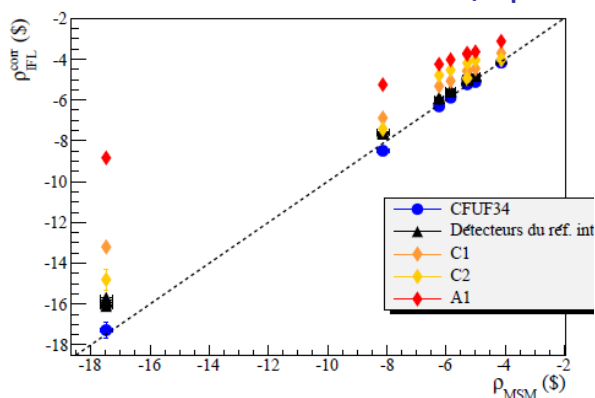
BACK UP

- Neutron detectors (fission chambers) at different locations in the core



- Monitoring of core reactivity :
 - excellent agreement between beam interruption and reference technique (MSM)
 - fine corrections must be applied for spatial effects

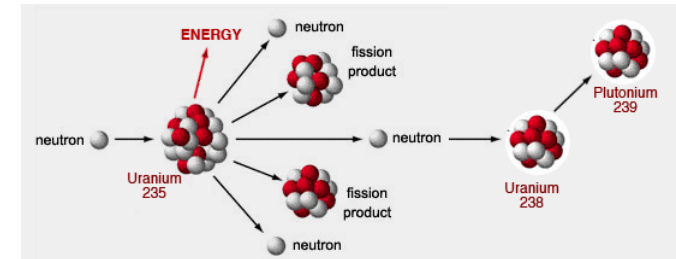
Avant/après correction des effets spatiaux



Mesure de la réactivité de réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur par l'analyse d'expériences d'interruptions de faisceau programmées (2016), T. Chevret (thèse)

- Le cycle nucléaire génère

- Des produits de fission
- Actinides majeurs (U, Pu) et actinides mineurs (Am, Cm, Np)

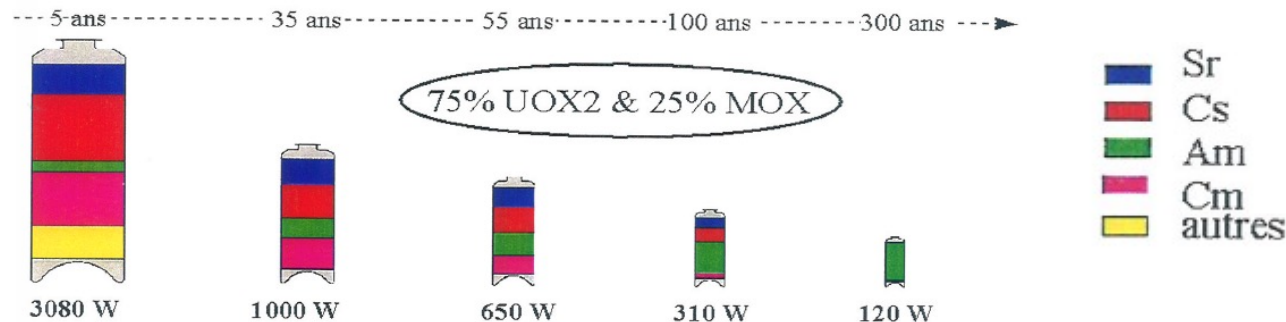


- About 2500 tons of Spent Nuclear Fuel are produced every year by 145 reactors in Europe

- High Level Waste (HLW)
 - represent 0.2% in volume & 95% in radiotoxicity
 - long-term dominated by **Minor Actinides** (especially ^{241}Am)
 - Reference solution for HLW management = long-term **geological disposals**

- In France (La Hague), spent fuel is reprocessed

- U and Pu are extracted (partitioning) to be reused as fuel: Mixed OXide fuel (MOX), future Gen.IV reactors...
- High-level wastes are conditioned (vitrification) & stored



- **Fault compensation scheme of cavities in the linac**
 - fast detection of faulty cavity (which is de-tuned)
 - re-tuning of neighbouring cavities to compensate (V, ϕ)
 - beam is restored

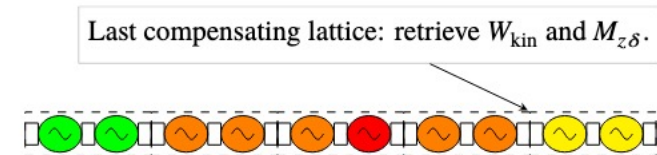
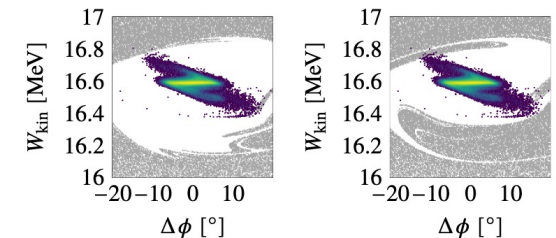


Figure 2: Scheme of the compensation strategy chosen for the MINERVA study. Green cavities are nominal. Failed cavities are in red. Orange represent retuned cavities. In yellow, the cavities that are only rephased.

- **Optimization of the re-tuning time**
 - Goal : determine compensation settings
 - Beam dynamics and multi-objective optimization
 - Development of a fast automatic tool : LightWin
- ➔ **MINERVA : settings for all single cavity failures, with losses <1 W/m**



(a) Nominal tuning. (b) Compensation of #14 failure.

Figure 4: Longitudinal acceptance of the MINERVA SC linac with the input beam distribution in the $[\Delta\phi, W_{kin}]$ phase space.

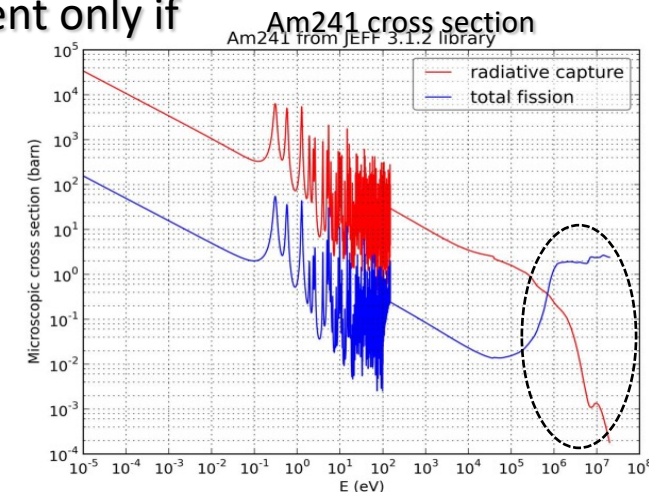
- **Such fault-compensation algorithms can be used for**
 - For ADS (JAEA),
 - but also for other operating accelerators such as SPIRAL2

➔ **Master Project IN2P3 : REFILL (Reliability and fast Failure compensation methods in RF superconducting Linacs)**

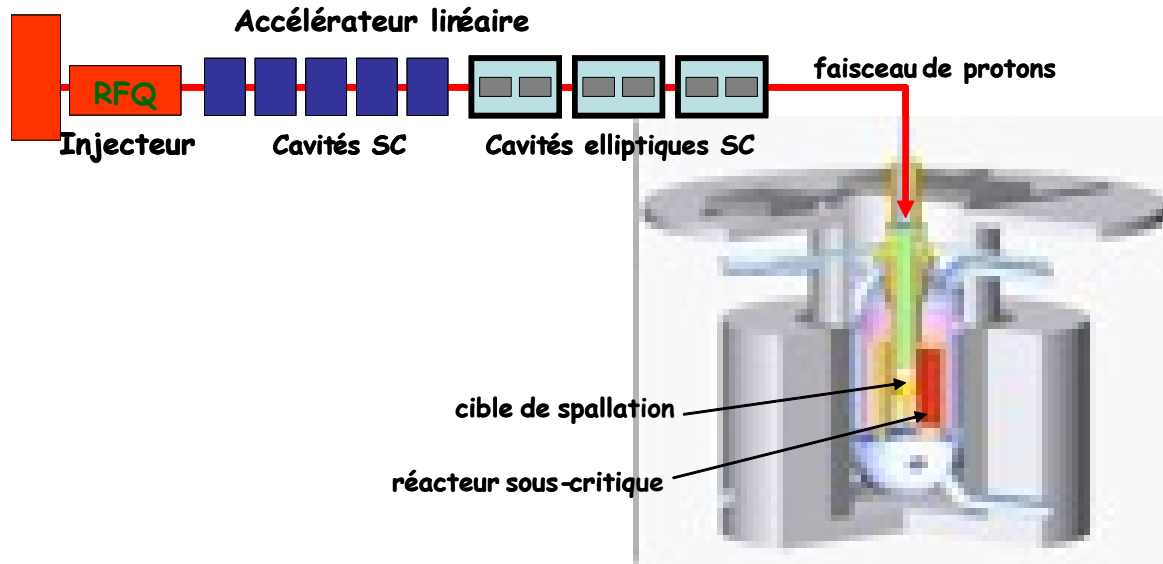
A. Plaçais et al, Cavity failure compensation strategies in superconducting linacs, doi:10.18429/JACoW-LINAC2022-TUPORI04

A. Plaçais et al, Automatic retuning of superconducting linacs using LightWin, doi:10.18429/JACoW-LINAC24-THXA001

- Instead of storing the long-lived waste, **the transmutation strategy proposes to:**
 - **reduce radiotoxicity and heat loads of long-lived nuclear wastes (especially MA)**
 - **thus minimize the surface required for waste storage**
- Transmutation of minor actinides (MA) into fission products is efficient only if
 - Fission to capture cross section ratio is high enough
 - ➔ **Need for a fast neutron spectrum (MeV)**
 - Enough neutrons are available to feed the transmutation process
 - ➔ **Need for an intense neutron source**
- Accelerator Driven System (ADS) : Concept innovant de réacteur utilisant de grandes quantités d'actinides mineurs (AM), ce qui est impossible dans les réacteurs critiques
 - Permet à la fois la transmutation des déchets à long temps de vie (AM) et la production d'énergie
 - ➔ les ADS permettent l'étude des scénarios de retraitement des déchets nucléaires



- Systèmes nucléaires pilotés par accélérateurs ou Accelerator Driven System (ADS)
- Réacteur sous-critique couplé à une source externe de neutrons pour entretenir la réaction en chaîne

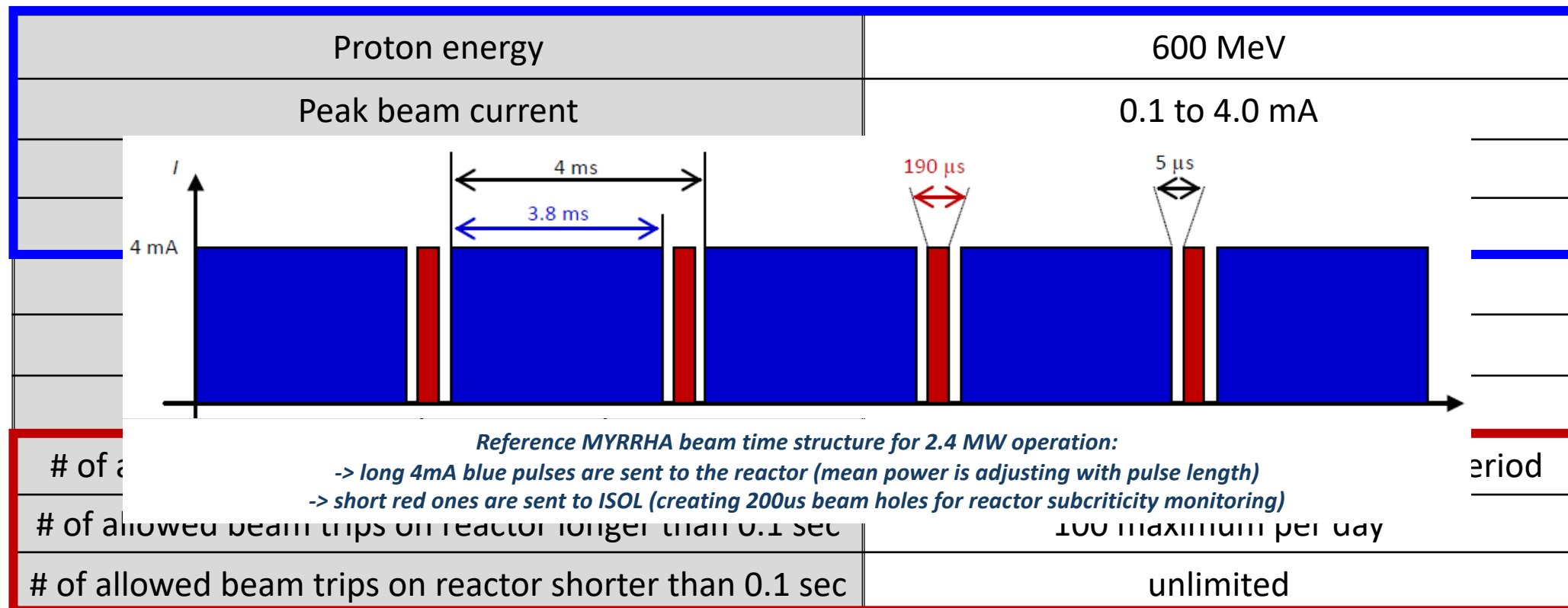


- Réacteur piloté par la source via le faisceau produit par l'accélérateur
- ADS
 - Réacteur
 - **Accélérateur → cette présentation**
 - Cible de production de neutrons

- Beam loss, often created by severe discharges, can affect the reactor
 - After a discharge, beam can be lost on target
 - Neutron production in reactor drops within tens of μ s
 - During long interruptions ($\sim$ s) reactor monitors detect a drop in neutron counts
 - When beam is restored, the monitors detect a sudden increase of neutron rate
 - If neutron multiplication rate exceeds reactor safety limit
 - ➔ Trigger of reactor emergency shutdown (SCRAM)
 - ➔ All reactor rods drop (safety and control rods)
- Reactor startup required to recover from every SCRAM requires $\sim$ 30 minutes
 - Rod liftup sequence: 6 safety rods one by one, then 2 control rods simultaneously
- Reactor SCRAMs : major cause of facility downtime

➔ machine reliability is the key to operate an ADS

→ High power proton beam (up to 2.4 MW)



→ Extreme reliability level

Reliability guidelines are required to design an ADS accelerator :

- **Robust design :**

- **Robust optics:** focussing current-independent, large acceptance, minimise loss, no resonance crossing
- **Conservative design :** all components will be operated well below their physical limits (derating)
- Make it as simple as possible
- Low thermal & mechanical stress
- Careful choice of ancillary system : pumps, cooling systems, etc..

- **Reparability**

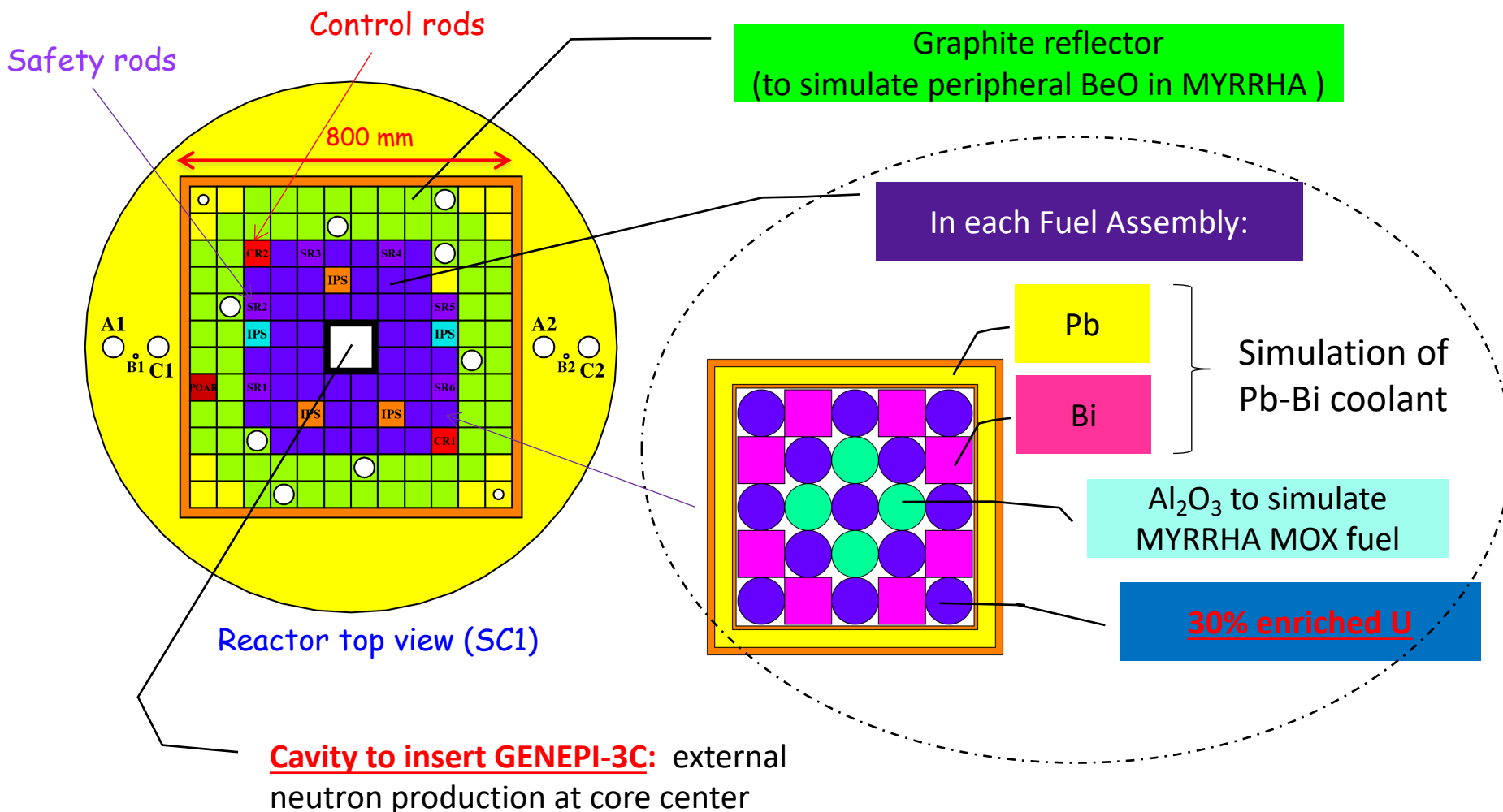
- **On-line where possible**
- Efficient maintenance scheme (MYRRHA : 1 month maintenance vs. 3 month operation)

- **Redundancy**

- **Serial** where possible (linac), or **parallel** (injector) even for ancillary systems
- **Failures** can be tolerated but must be **mitigated** to guaranty a **high fault tolerance**
- **Fault compensation scheme** : Introduced during design studies of the MYRRHA accelerator, requires margins

J.-L. Biarrotte, D. Uriot, "Dynamic compensation of an RF cavity failure in a superconducting linac", Physical Review ST: A&B, 2007

- Reactor configuration SC11 : as representative as possible of MYRRHA with $k_{\text{eff}} = 0.95845 < 1$





Ligne verticale mobile :
5 m, 400 kg
jeu < 2 cm !

