

Expériences de physique et technologie des réacteurs

**A. Billebaud, G. Ban, S. Chabod, P. Dessagne, X. Doligez, V. Ghetta,
M. Kerveno, F.-R. Lecolley, J.-L. Lecouey, G. Lehaut, N. Marie**

Avec le soutien (énorme) des services techniques et accélérateurs



- **Expériences de physique des réacteurs → Accelerator Driven System**
 - *Objectifs des projets GUINEVERE, FREYA*
 - *Démarche expérimentale*
 - *L'installation "GUINEVERE"*
 - *Travaux en cours et premiers résultats*
 - *Retour d'expérience et perspectives*

- **Expériences sur la technologie des sels fondus → Molten Salt Fast Reactor**
 - *Contexte et objectifs du projet FFFER*
 - *Avancement du projet*
 - *Perspectives*

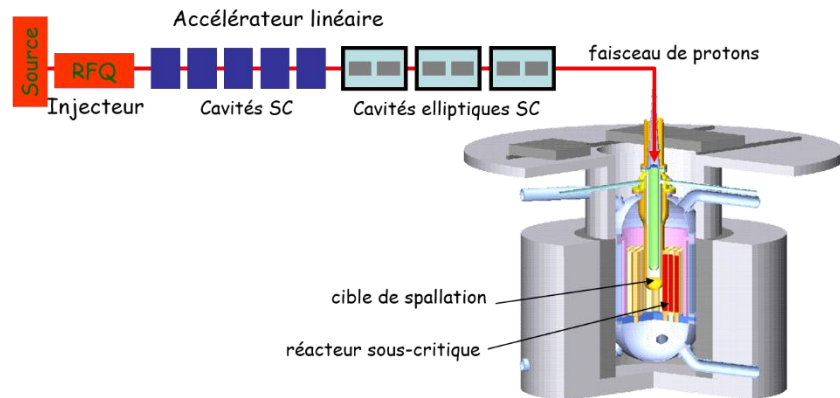
- **Conclusions**

➤ Objectifs des projets GUINEVERE et FREYA

- Travaux expérimentaux de couplage (cœur/accélérateur) dédiés à la faisabilité des ADS (en particulier pour la préparation du projet MYRRHA)
- Validation codes/schémas de calcul pour un cœur sous-critique et rapide (ADS=systèmes pour la transmutation des actinides)
- Contrôle en ligne de la réactivité (= niveau de sous-criticité du cœur) → sûreté

Comment:

- Découplage physique du cœur / physique de la cible
- Maquettes faibles puissances : pas d'effets thermiques ni d'évolution du combustible



Cœur sous-critique:
facteur de multiplication effectif

$$k_{\text{eff}} < 1$$

(cœur critique: $k_{\text{eff}}=1$)

Expériences pour les ADS

GUINEVERE

- Generator of **U**ninterrupted Intense **NE**utron at the lead **VE**nus **RE**actor
- Part du projet EUROTRANS-IP (FP6) 2005-2010, intégré fin 2006
- Couplage du réacteur VENUS-F à la source de neutrons GENEPI-3C pour disposer d'une installation où poursuivre les travaux commencés dans MUSE (**MU**ltiplication d'une **S**ource **E**xterne, 1996-2004)
- Construction de l'installation par SCK-CEN, **IN2P3**, CEA/DEN: 2006-2010
- Programme experimental dédié au monitoring de la réactivité, abordé pendant le commissioning de l'installation (2011-2012)

FREYA

- Fast **R**eactor **E**xperiments for **hY**brid **A**pplications
- Projet EURATOM FP7 (2011-2016) porté par SCK-CEN
- Poursuite et extension du programme initial de GUINEVERE, en soutien au projet MYRRHA

IN2P3 →

- **WP1 : méthodologies de monitoring de la réactivité d'un ADS**
- WP2: étude de cœurs sous-critiques pour le design et le licensing de MYRRHA
- WP3: étude de cœurs critiques pour le design et le licensing de MYRRHA
- WP4: étude de cœurs critiques pour les réacteurs rapides au plomb (LFR)

Investissement de l'IN2P3

- En termes humain et financier l'IN2P3 (co-fondateur du projet GUINEVERE) est le **premier partenaire après SCK-CEN**
- **LPSC, LPCC, IPNO, IPHC** ont conçu et construit la source de neutrons GENEPI-3C (2006-2010)
- Le Service Accélérateurs du **LPSC assure la conduite** (~3 pers.) **et la maintenance de l'accélérateur**, avec l'appui des services techniques du LPSC, en particulier informatique et électronique (contrôle&commande et acquisition de données)
- Depuis que le cœur est sous-critique (mai 2011) **les équipes de physique assurent une grande partie de la prise de données sur le terrain** (7 personnes dont 3 EC): données commissioning et programme FREYA:
 - En charge des moniteurs de neutrons
 - Fournisseur de l'acquisition de données (LPSC+LPCC), du cahier d'expérience électronique
 - Auto-désignées responsables de la qualité des données (suivi, cohérence, inventaire, tutorat des partenaires, programmes hebdomadaires,...)
- Les équipes de physique se consacrent également à **l'analyse de données et des cœurs sous-critiques**

➤ Démarche expérimentale

- Nécessité du contrôle de la réactivité:

- **puissance pilotée par l'intensité** du faisceau tant que le réacteur est sous-critique

$$P_{th}(t) = I(t) \frac{E_p}{eE_{spal}} \frac{E_f}{\nu} \varphi^* \frac{1}{|\rho|}$$

- pour la **sûreté** du système on doit **s'assurer en permanence** que l'écart à la criticité ($\rho=0$) reste dans une marge de sécurité (définie à partir des différentes causes possibles d'apport de réactivité: $\rho < \rho_{max}$)
- peut-on **simplement** monitorer la réactivité ρ ?

$$\rho(t) \propto \frac{I(t)}{P_{th}(t)} = C \frac{I(t)}{\Phi(t)} \rightarrow \text{mesurables}$$

C difficile à calculer, et susceptible d'évoluer (lentement) donc à mesurer

➔ besoin d'une « méthodologie » pour accéder « en ligne » à la réactivité

La réactivité c'est quoi ?

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$

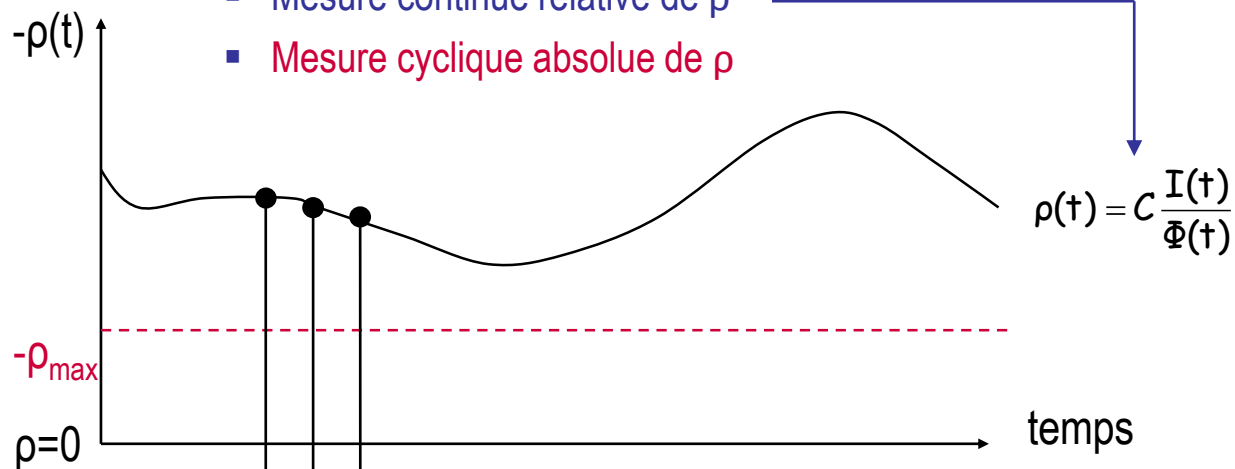
Criticité: $\rho=0$

Sous-criticité: $\rho < 0$

Expériences pour les ADS

- Méthodologie du monitoring de la réactivité: double approche

- Mesure continue relative de ρ
- Mesure cyclique absolue de ρ



Combinaison des deux

$$\rho(t) = C_1 \frac{I(t)}{\Phi(t)}$$

$$\rho(t) = C_2 \frac{I(t)}{\Phi(t)}$$

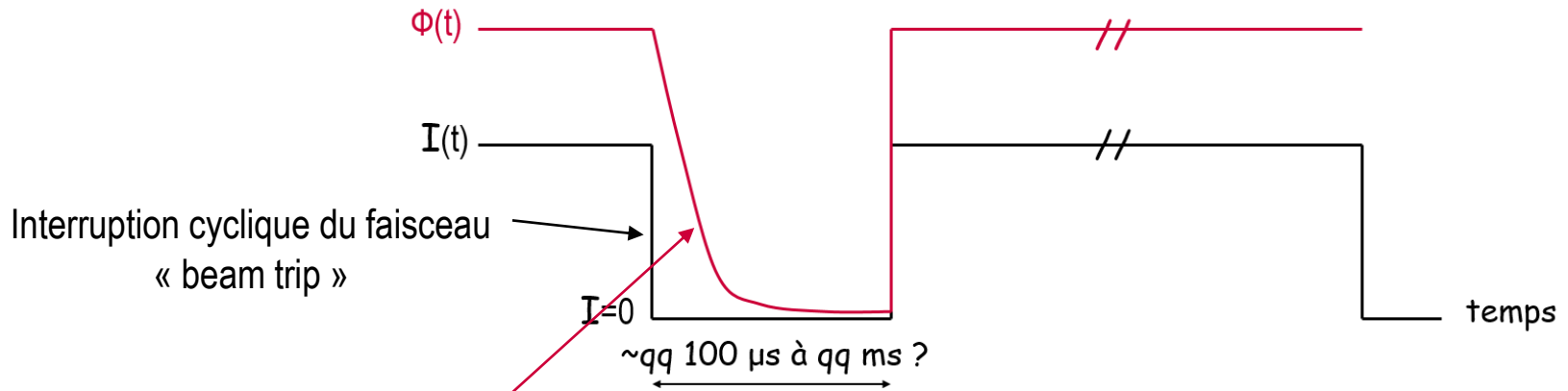
$$C_1 = \rho_1 \frac{\Phi(t_1)}{I(t_1)}$$

$$C_2 = \rho_2 \frac{\Phi(t_2)}{I(t_2)}$$

$$C_3 = \rho_3 \frac{\Phi(t_3)}{I(t_3)}$$

Expériences pour les ADS

- Démarche expérimentale:
 - **Valider** les méthodes de mesure **continue/relative** et **cyclique/absolue** et la **méthodologie dans son ensemble** et **prouver sa robustesse**
 - Point épineux: **comment faire une mesure absolue de ρ ?**
 - ➔ pas possible en fonctionnement statique du réacteur
 - ➔ besoin d'une mesure « **dynamique** » et donc d'une **variation de la source**



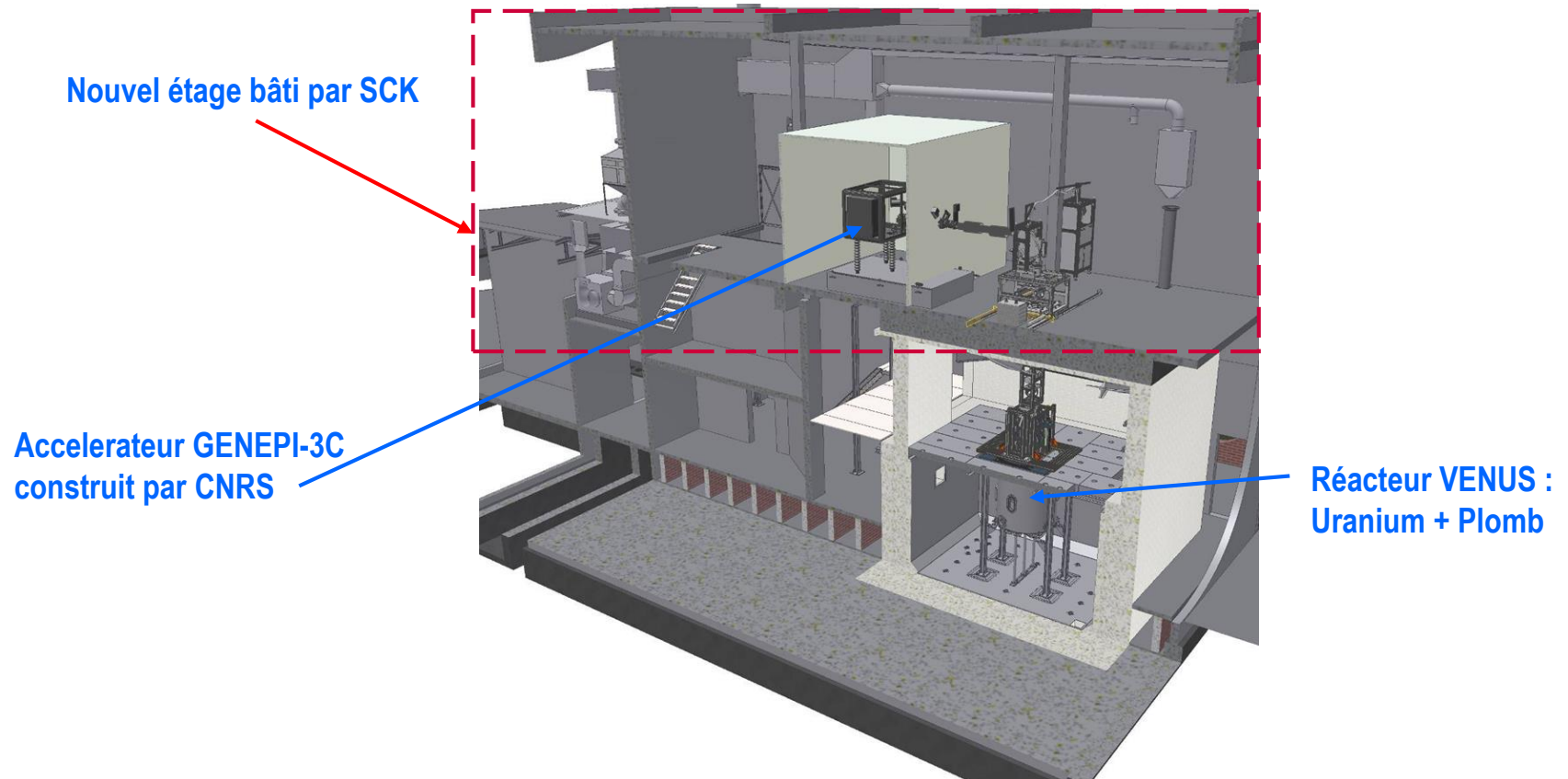
- **Enregistrement de l'évolution temporelle de la population de neutrons pendant l'interruption**
 - ➔ Utilisation d'un modèle permettant d'extraire la réactivité de cette mesure
 - ➔ **Quel modèle ? C'est la question !**

Expériences pour les ADS

- Cheminement:
 - **Caractériser la réactivité de plusieurs configurations sous-critiques** dans la gamme de celles envisagées pour un ADS de puissance: $0.95 < k_{\text{eff}} < 0.97$ à l'aide d'une méthode de référence (méthode par comparaison au niveau critique)
 - **Réaliser des mesures dynamiques** pour ces mêmes configurations avec la source de neutrons en mode « continu interrompu »
 - **Comparer les valeurs de réactivité obtenues en appliquant différentes « méthodes » ou « modèles » aux valeurs « de référence »**
 - **Estimer les biais des méthodes** (et les possibles corrections)
 - **Déterminer la précision** des mesures de réactivité des méthodes validées
 - **Tester la robustesse de la méthodologie** en introduisant des modifications dans le cœur comme: position de la source, composition du réflecteur, ajout de dispositifs de mesure,...
 - Tenter **d'extrapoler/transposer la méthodologie vers un système de puissance...** (complexe en raison des effets thermiques, d'évolution du cœur,...)
 - **Faire des recommandations pour les caractéristiques des interruptions de faisceau et la réalisation des mesures de monitoring**

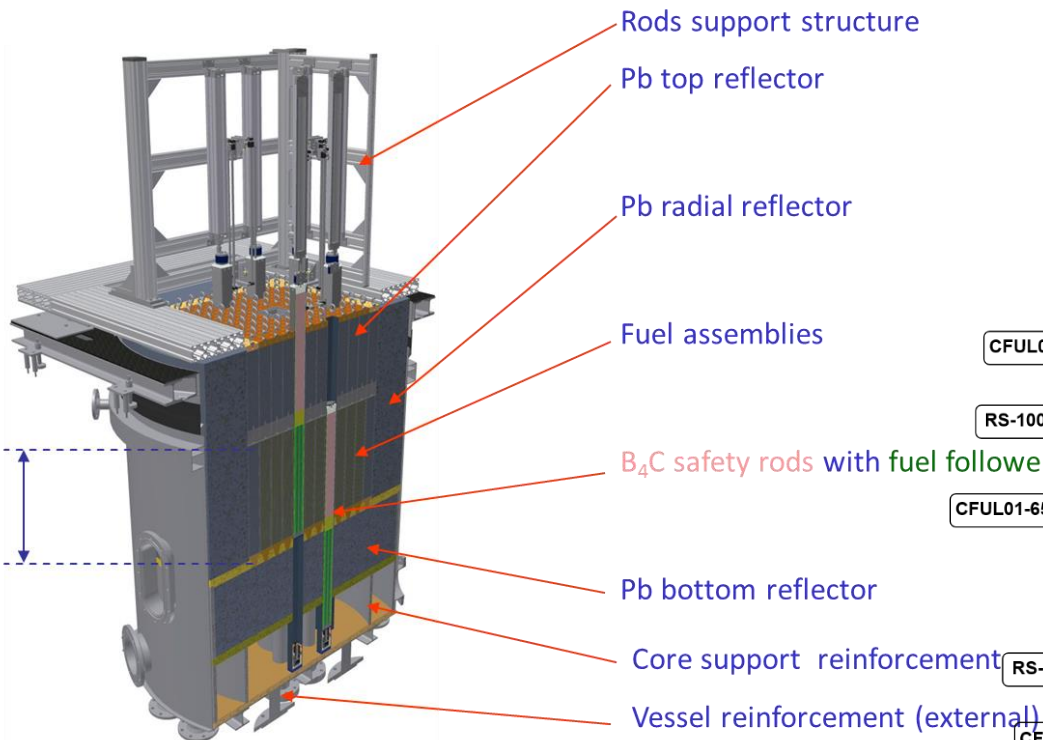
➤ **L'installation "GUINEVERE" @SCK-CEN, Mol, Belgique**

- Couplage vertical

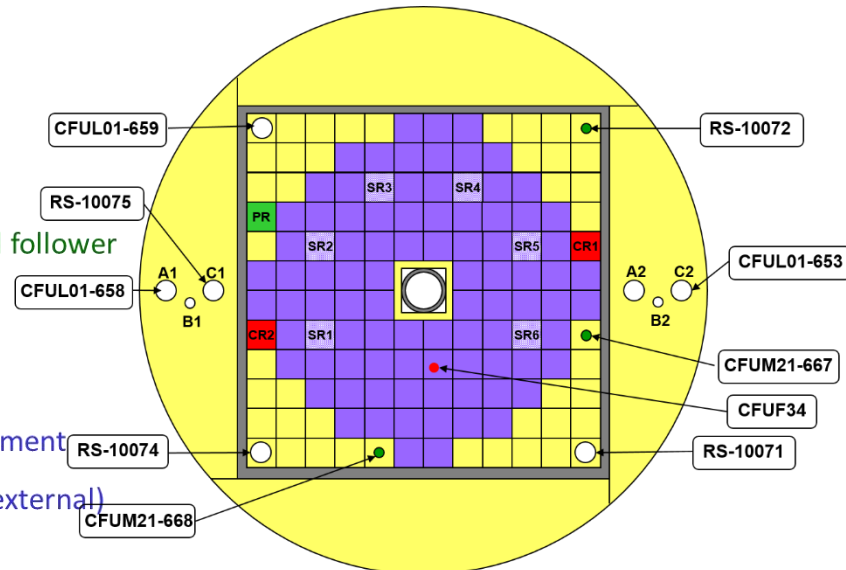


Expériences pour les ADS

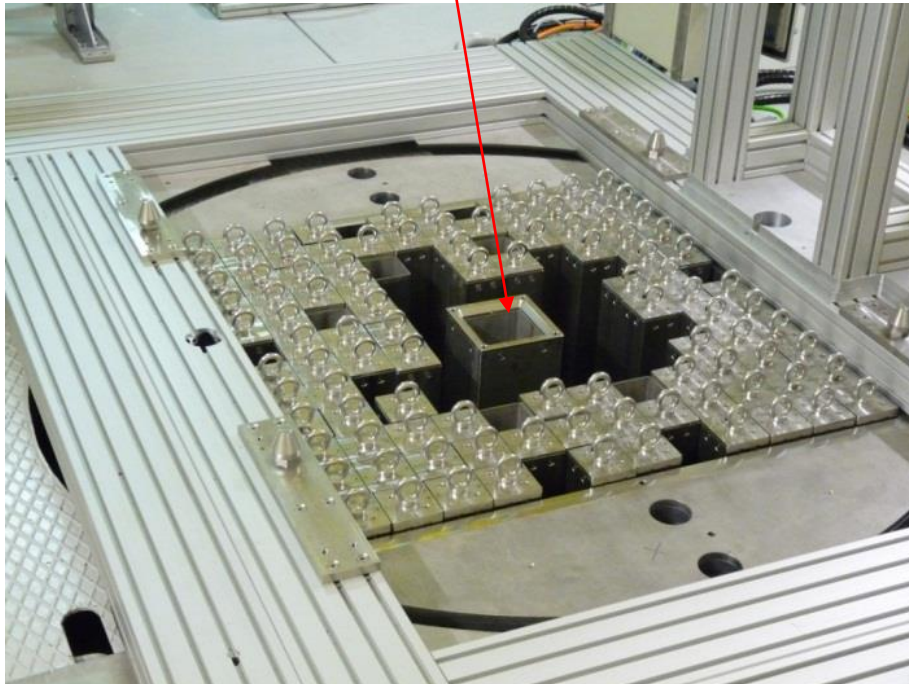
- Le réacteur VENUS-F (Fast)
 - Combustible: uranium métallique enrichi à 30% en U5
 - « Caloporteur »: plomb solide (pas de puissance)
 - Réflecteurs axiaux et radial: plomb solide



Configuration sous-critique:
 93 assemblages combustible
 6 barres de sûreté (~14 \$)
 2 barres de contrôle (~1.1 \$)
 $\Lambda \approx 0.39 \mu\text{s}$
 $\beta_{\text{eff}} \approx 724 \text{ pcm}$



Tube d'insertion du doigt de gant de l'accélérateur

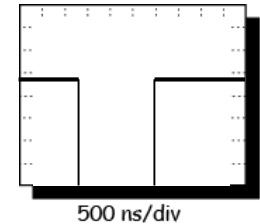
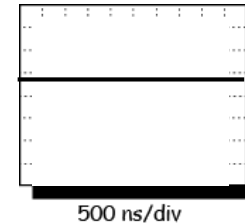
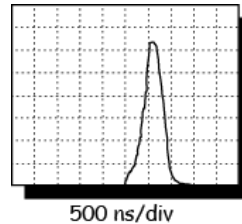


Situation couplée



Expériences pour les ADS

- L'accélérateur GENEPI-3C (source de neutrons D-T)
 - Construit par une collaboration IN2P3
 - Production de neutrons: faisceau de deutons de 250 keV sur cible TiT
 - **Plusieurs modes** de fonctionnement **de la source** requis par le programme expérimental:



	Mode Pulsé	Modes Continu and continu interrompu
Courant crête/Courant moyen	40 mA	160 μ A à 1 mA
Fréquence des impulsions ou des interruptions	10 à 4700 Hz	10 Hz à 100 Hz
Durée des impulsions ou des interruptions	700 ns	100 μs à 10 ms
Temps de transition On/off	-	~ 1 μ s
Diamètre faisceau	~40 mm	~40 mm
Intensité de la source de Neutrons	8×10^9 n/s (4 kHz)	10^9 - 10^{11} n/s



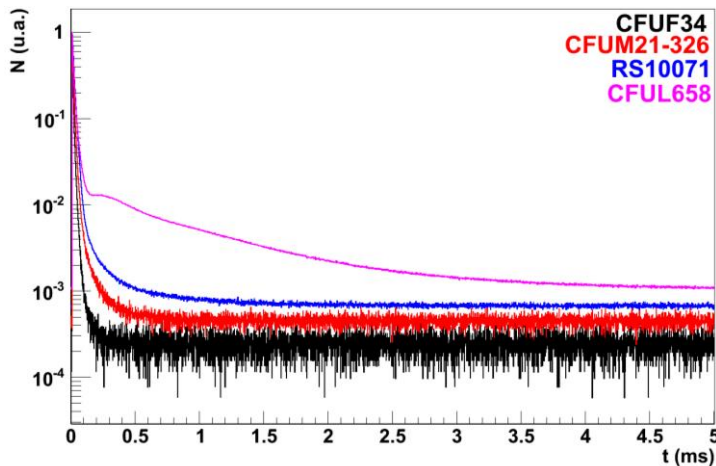
Vue isométrique
Echelle : 1:10

➤ Travaux en cours et premiers résultats

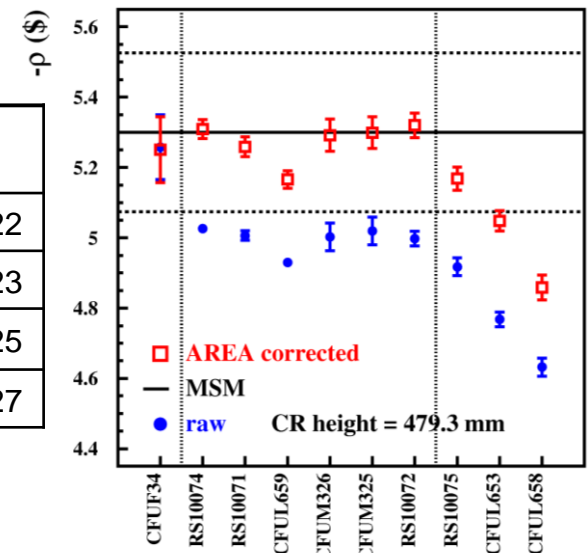
- Premières analyses de données obtenues avec une source pulsée:
 - Analyse avec la méthode classique dite « des aires »

$$-\rho_{\$} = \frac{A_p}{A_d} = -\frac{\rho}{\beta_{eff}}$$

- Mise en évidence d'un effet « spatial » en fonction de la position des détecteurs
- Estimation et application des corrections sur cet effet
- Bons résultats sauf pour deux détecteurs loin du cœur

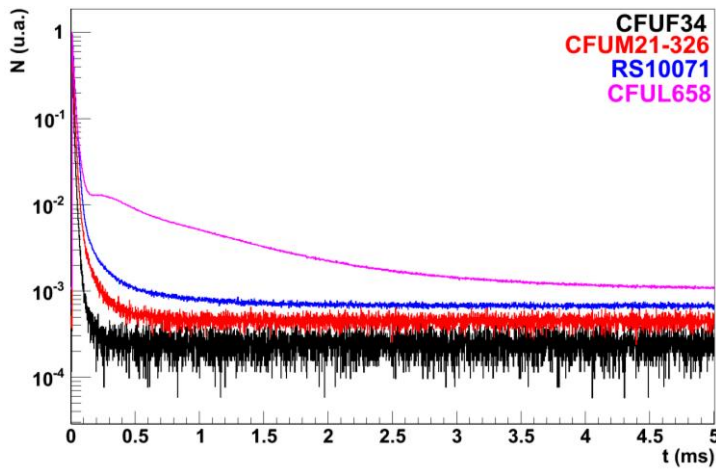


CR height (mm)	$\langle \rho \rangle_{\Area	$\langle \rho \rangle_{\MSM
600	-5.09 ± 0.03	-5.09 ± 0.22
479.3	-5.26 ± 0.03	-5.30 ± 0.23
240	-5.91 ± 0.05	-5.92 ± 0.25
0	-6.31 ± 0.05	-6.35 ± 0.27

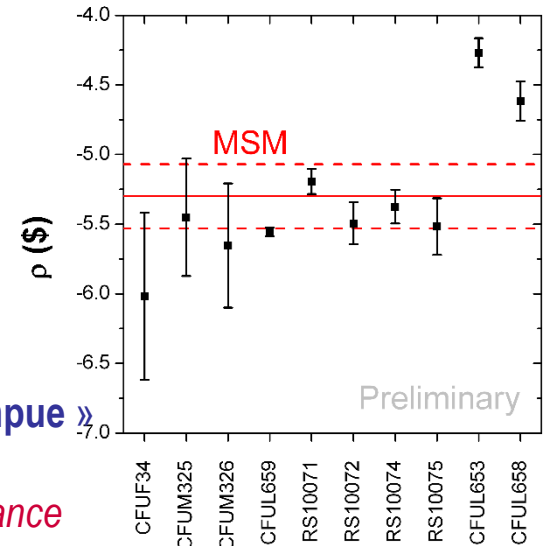


➔ Marie et al., TCADS-2, 21-23 mai 2013, Nantes, France

- Premières analyses de données obtenues **avec une source pulsée**:
 - Analyse avec une méthode **innovante** (contribution CNRS, MUSE, Perdu et al. 2003) permettant d'extraire « k_p » par comparaison des $N(t)$ mesuré et théorique:
 - Comparaison des dérivées log (Perdu et al.), très sensible aux fluctuations statistiques des données
 - Comparaison d'un **nouvel estimateur intégral** (Chabod et al.)



$$W(t) = \frac{\int_{t'=t_{\min}}^t N(t')^2 dt'}{\left(\int_{t'=t_{\min}}^t N(t') dt' \right)^2}$$



Lien entre k_p et ρ ?

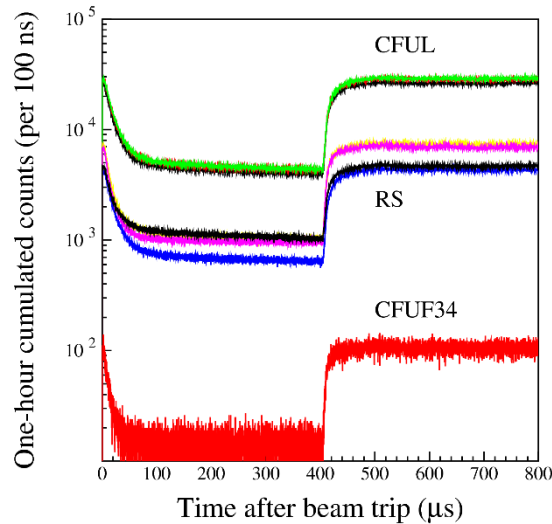
$$k_p = k_{eff} (1 - \beta_{eff})$$

$$\rho = \frac{k_p - 1 + \beta_{eff}}{k_p}$$

- Bons résultats sauf pour deux détecteurs loin du cœur
- Méthode prometteuse à appliquer aux mesures avec « **source interrompue** »

→ Chabod et al., TCADS-2, 21-23 mai 2013, Nantes, France

- Analyses de données obtenues avec une **source continue interrompue** en cours
 - Thèse de T. Chevret: *premiers résultats à soumettre à la Conférence Physor 2014, oct. 2014, Kyoto, Japon*



- Développement en cours d'un code déterministe basé sur la théorie de la diffusion pour disposer d'un outil simple et rapide (comparé aux calculs Monte Carlo) pour évaluer les effets spatiaux et spectraux d'intérêt dans les calculs des facteurs de correction

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{v_g} \frac{\partial \psi^g(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot D^g(\vec{r}) \vec{\nabla} \psi^g(\vec{r}, t) - \Sigma_a^g \psi^g(\vec{r}, t) \\ \quad - \sum_{g' > g}^G \Sigma^{g \rightarrow g'} \psi^g(\vec{r}, t) \\ \quad + \sum_{g'=1}^G \left(\chi_g \nu \Sigma_f^{g'} (1 - \beta) + \Sigma_{g' \rightarrow g} \right) \psi^{g'}(\vec{r}, t) \\ \quad + \sum_i^I \lambda_i \chi_i^g C_i(\vec{r}, t) \\ \frac{\partial C_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\lambda_i C_i(\vec{r}, t) + \beta_i \sum_{g=1}^G \nu \Sigma_f^g \psi^g(\vec{r}, t) \end{array} \right.$$

➤ *Retour d'expérience et Perspectives*

- Excellente collaboration sur le terrain entre les équipes belge et française
 - Temps expérimental effectif auprès du réacteur faible (horaires, contraintes, faible effectif, interruptions,...)
 - Temps de disponibilité de l'accélérateur soumis à aléas
- Données expérimentales de très bonne qualité
- Premiers résultats (IN2P3) très prometteurs, quantification des incertitudes à effectuer
- A ce jour 3 campagnes de mesures ont été réalisées pour le WP1 de FREYA, ce qui représente environ 50% du programme WP1 (1,5 an)
- Il est plus que probable qu'à la fin du projet FREYA toutes les mesures nécessaires aux objectifs scientifiques ne seront pas réalisées: il est déjà temps de prévoir un programme post FREYA → réflexion en cours
- Un important travail de transposition vers un ADS de puissance reste à accomplir
- La représentativité des cœurs de FREYA pour le projet MYRRHA se pose: réflexion à mener avec notre partenaire SCK-CEN pour un futur projet

- **Expériences de physique des réacteurs → Accelerator Driven System**
 - *Objectifs des projets GUINEVERE, FREYA*
 - *Démarche expérimentale*
 - *L'installation "GUINEVERE"*
 - *Travaux en cours et premiers résultats*
 - *Retour d'expérience et perspectives*

- **Expériences sur la technologie des sels fondus → Molten Salt Fast Reactor**
 - *Contexte et objectifs du projet FFFER*
 - *Avancement du projet*
 - *Perspectives*

- **Conclusions**

➤ Contexte et objectifs du projet FFER

- Nouveau concept de réacteur GEN IV à sels fondus en cycle thorium: $\text{LiF-ThF}_4\text{-UF}_4$ à 550-700 ° C
besoin d'un nettoyage du sel combustible pour garantir sa **qualité** (neutronique) et la **préservation du système** (circuits, composants):
 - Nettoyage « chimique », déporté, par batch (ajustement de la composition)
 - Nettoyage « physique »

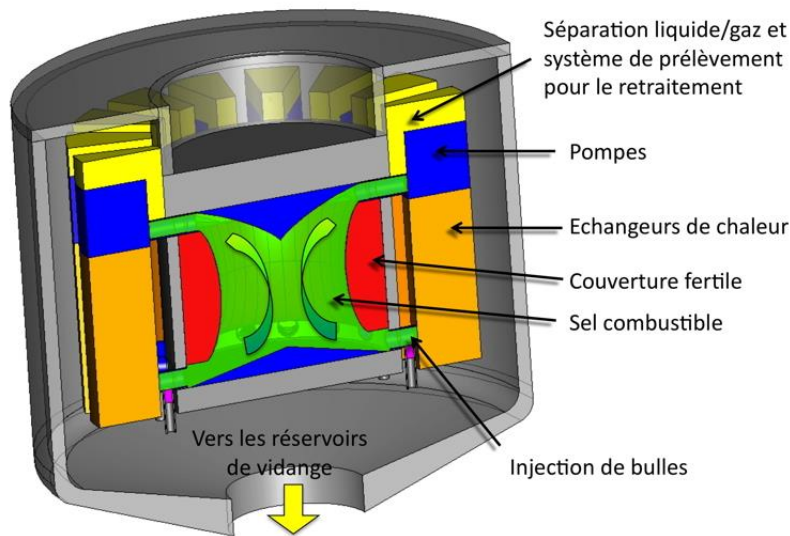
Pourquoi un nettoyage physique ?

- Nombreux phénomènes physico-chimiques à l'œuvre dans un combustible liquide:
 - *apparition de particules*
 - *nucléation de bulles*
 - *grossissement*
 - *solidification*
 - *coalescence*
 - *transport*
 - *érosion*
 - *dépôt*
- + mécanismes de fond :
- *des phénomènes capillaires*
 - *des effets thermodynamiques*
 - *écoulements turbulents complexes*

➔ Retrait des gaz, particules, agrégats, indispensable pour le contrôle du système

Comment ?

- Par la technique du **bullage** : **injection de bulles** dans le sel qui vont piéger les impuretés qui seront ensuite récupérées et éliminées dans un **séparateur liquide/gaz**



Cette technique permet:

- une surface d'échange importante
- une courte distance de diffusion des éléments si la dispersion est correcte

Son efficacité dépend:

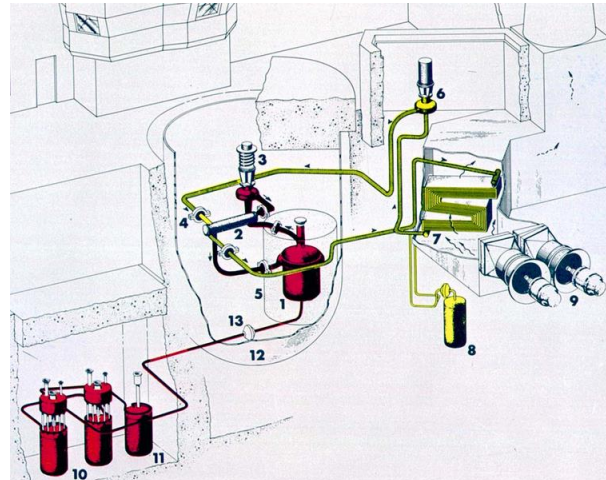
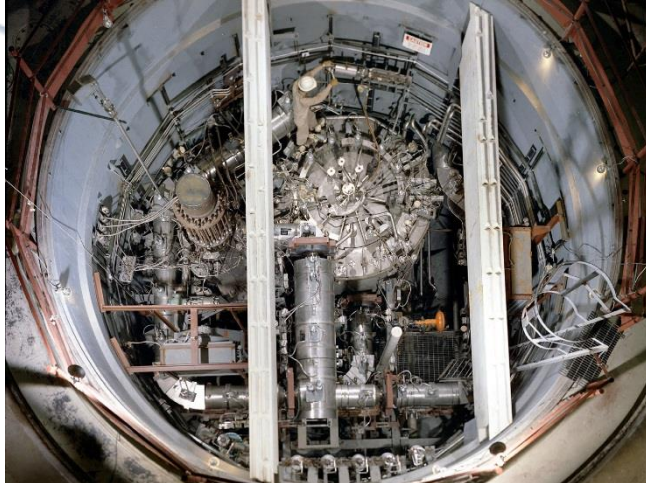
- des conditions hydrodynamiques
- de la taille et de la dispersion des bulles
- du temps de séjour
- de la physicochimie du système (gaz, liquide, particules)

- Sur un sel circulant, pour avoir une bonne efficacité sans ralentir le liquide, le **bullage** doit être effectué **en ligne**, dans le sens du sel: **système co-courant**

→ **Verrou technologique car un système de bullage en ligne doit être intégré dès le design du réacteur**

Etat des lieux

- Dernières études en date **arrêtées en 1970** à Oak Ridge NL, projet MSRE

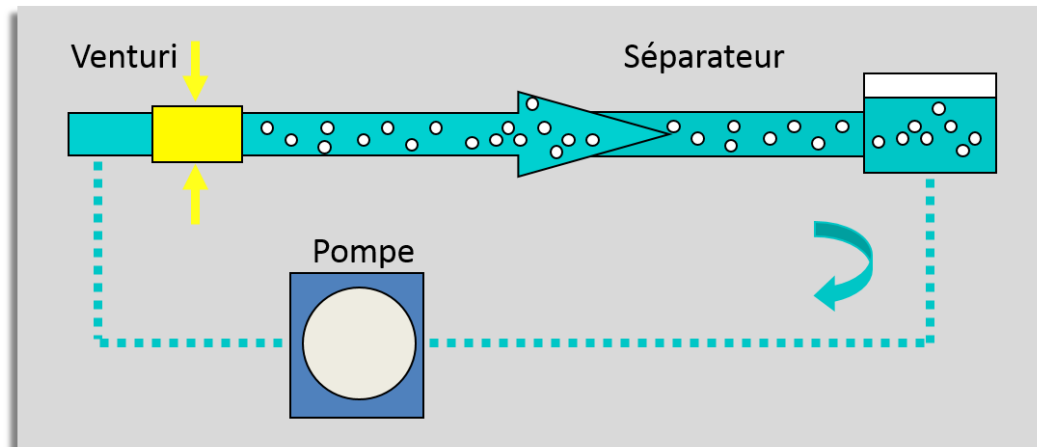


- 1.Reactor Vessel
- 2.Heat Exchanger
- 3.Fuel Pump
- 4.Freeze Flange
- 5.Thermal Shield
- 6.Coolant Pump
- 7.Radiator
- 8.Coolant Drain Tank
- 9.Fans
- 10.Fuel Drain Tanks
- 11.Flush Tank
- 12.Containment Vessel
- 13.Freeze Valve

- Aujourd'hui:
 - Progrès général de l'instrumentation scientifique / années 70
 - Apparition des méthodes numériques de simulation en thermique, hydrodynamique...
 - Acquis des travaux en R&D sur les métaux liquides 1970...2009
 - Pas beaucoup plus de données expérimentales qu'à l'époque
 - Pas d'outils de validation
 - **Savoir faire et vivier humain quasi disparus**
 - **Crédibilité et difficultés pour convaincre les partenaires de l'intérêt de ces systèmes**

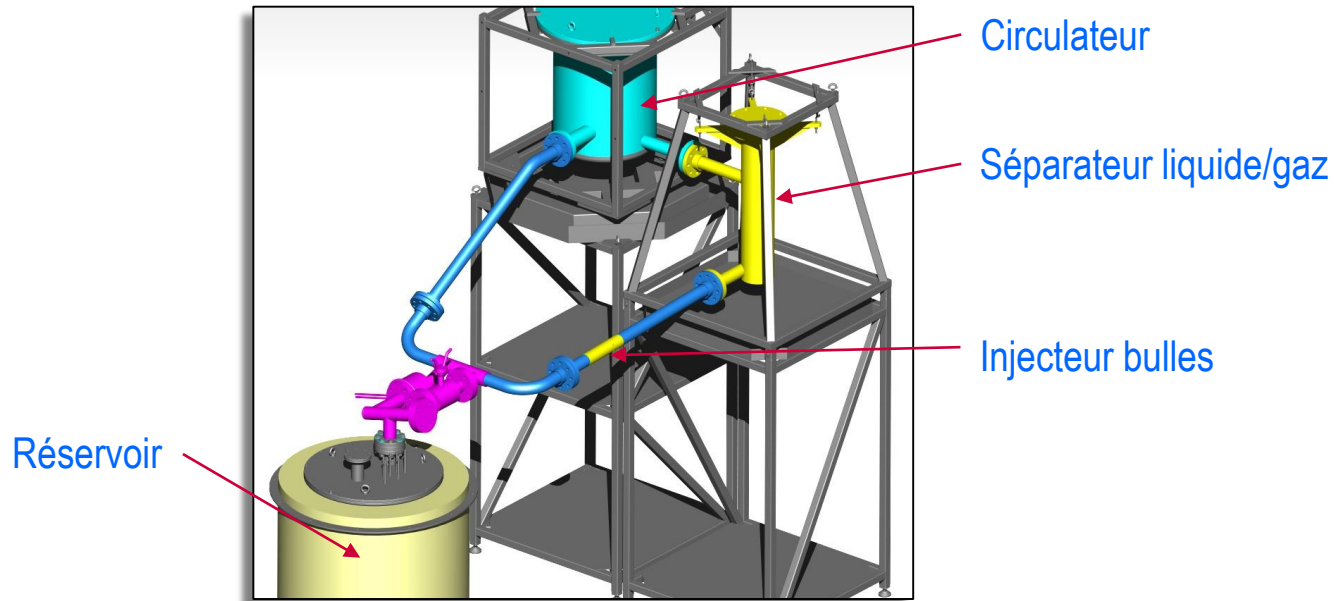
Le projet FFFER

- Forced Fluoride Flow for Experimental Research (2008-2014)
- Objectifs: construire une boucle en convection forcée avec un sel fluorure (fusion ~ 450 ° C) à une échelle cohérente vis-à-vis des effets thermo-hydrau, ~ 50 litres de sel pour:
 - Travail sur le “procédé” de séparation en utilisant des maquettes à eau
 - Travail sur tous les composants techniques, instrumentation de la boucle réelle
 - Etude de l'extraction par bullage des gaz rares dissous
- **Financements:** IN2P3, PACEN, UJF, Institut Carnot « Energies du futur »



➤ *Avancement du projet*

- Critères choisis pour la construction:
 - Circulation forcée rapide (\approx m/s) de fluorure LiF-NaF-KF
 - Température 500° à 750° max
 - Système d'injection de bulles
 - Système de séparation des bulles
 - Mesure de l'évolution de la concentration des gaz à extraire



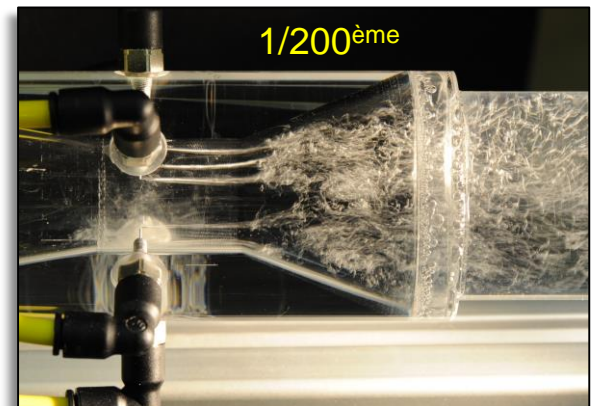
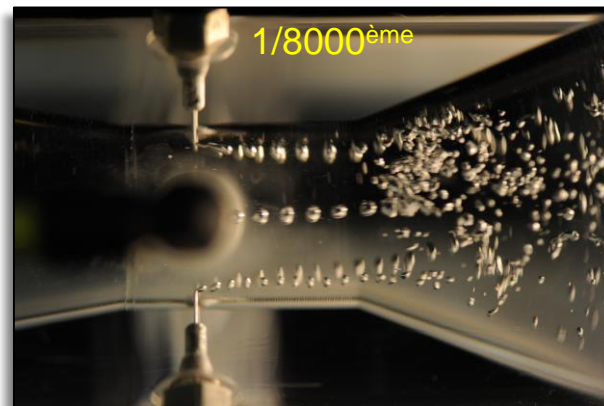
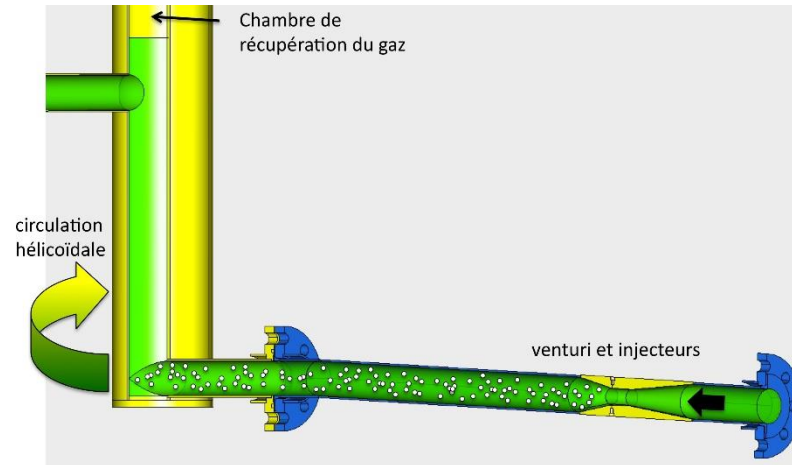
Expériences pour les MSFR

- Réalisations :
 - Services mécaniques, instrumentation et électronique du LPSC 1 h.an pendant 5 ans et service technique général et 1 chercheur
 - Adaptation des locaux (2009)
 - Fabrication de 160 kg de sel en boîte à gants (1 an)
 - Conception, fabrication, montage, tests, de la boucle



Expériences pour les MSFR

- Etudes parallèles:
 - Maquettes en eau pour tests et **modélisation** de l'injection de bulles



➤ Perspectives



- Mise en service de la boucle prévue en janvier 2014
- Exploitation (durée ?): prise de données, validation instrumentation et du procédé, analyse post exploitation
- Travaux de simulations thermo-hydrauliques en développement ...

- **Objectifs scientifiques:**
 - Progrès en cours sur le procédé et l'instrumentation
 - Avancée dans l'intégration du bullage au design du MSFR

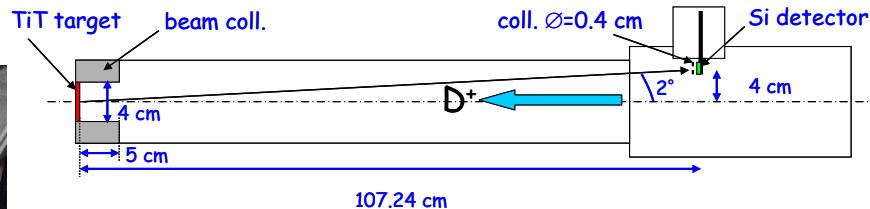
- **Objectifs techniques:**
 - Réappropriation des aspects techniques et instrumentation
 - Noyau de compétences interdisciplinaires au LPSC mais **effectif très réduit**
- **Comment transformer l'essai ?**
 - La crédibilité d'une nouvelle filière comme le MSFR requiert une approche expérimentale
 - Démarche soutenue par les partenaires nationaux CEA, EDF, AREVA... mais pas de réel engagement humain et politique pour initier et soutenir un programme à long terme dans ce champ disciplinaire
 - **Quel devenir au-delà de 2014 ?**

Conclusions

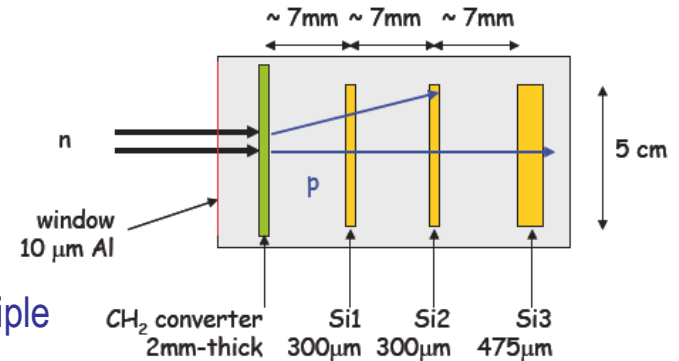
- L'effort expérimental nous semble **indispensable pour** notre **crédibilité** en physique des réacteurs (et pas seulement pour celle des systèmes étudiés) auprès des partenaires au cœur du métier (CEA, EDF, IRSN, ...)
 - Les expériences nous ont permis de faire nos armes, d'apporter notre approche de la physique nucléaire expérimentale (travail avec faisceaux accélérés) et d'être à présent des **acteurs moteurs dans le domaine sur le plan européen**
 - Cet apprentissage permanent **nourrit les études systèmes** (sur le plan aussi bien physique que technique)
- Cette approche **consolide et illustre l'enseignement de la discipline** (physique des réacteurs et thermo-hydraulique, TP sur maquettes eau)
- Les expériences ont un **coût significativement plus élevé que les simulations**: les 2/3 au moins sont assurés par des ressources propres dont les **projets européens** (EURATOM) qui, en dépit de leur lourdeur restent une **ressource à maintenir autant que possible (travail à faire sur les appels à projets)**
- Malgré des phases de construction et de mise en place projet parfois longues, voire ingrates nous ne perdons pas de vue notre **premier objectif qui reste la production scientifique**: moisson en cours, **publications sous peu !**

Back-up/ Moniteurs neutrons GUINEVERE

- Monitoring absolu: 2 détecteurs silicium “API et PI”
 - Spectrometrie des particules Alpha de la reaction $d(T,n)^4\text{He}$
 - ~ 107 cm au-dessus de la cible
 - Efficacité géométrique:
 $(8.613 \pm 0.077) \times 10^{-7}$



- Monitoring relatif : “SINGE”
Télescope à protons de recul
 - ~ 6.5 m au-dessus de la cible
 - comptage des coïncidences triple



Back-up/ FFER: le bouchon froid

