

---

**WP**  
**« Nuclear Physics »**  
**or**  
**« Reactor Physics » ? « Nuclear Physics for Energy » ?**

**A. Billebaud (Equipe Physique des Réacteurs)**  
**D. Heuer (Equipe MSFR)**

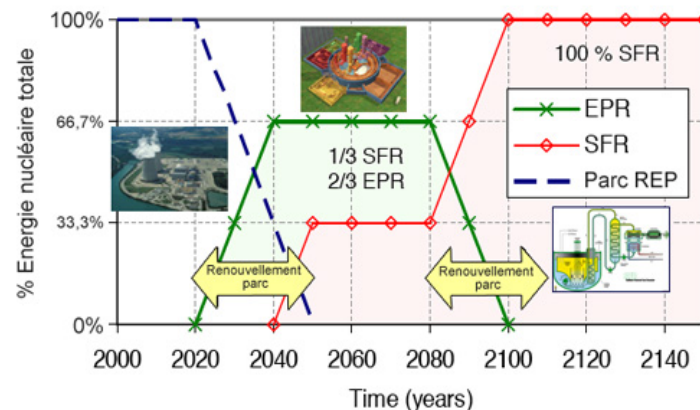
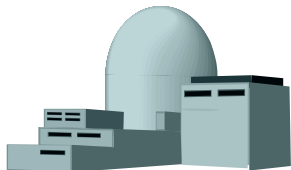


- **Présentation de la thématique et des activités de recherche associées (AB)**
- **Présentation des perspectives (1/2): équipe physique des réacteurs (AB)**
- **Présentation des perspectives (2/2): équipe MSFR (DH)**
- **Conclusions (DH)**

# La physique des réacteurs

## ➤ Les enjeux de la thématique

- La gestion des déchets nucléaires du parc actuel (lois de 1991 et 2006)
  - Gestion des actinides mineurs (responsables de la radiotoxicité à long terme)
  - Gestion du plutonium si non recyclé en systèmes rapides
  
- Le développement de nouvelles filières de production d'énergie nucléaire répondant à des critères plus exigeants (Génération IV) en termes de:
  - Sûreté
  - Durabilité (économie des ressources)
  - Minimisation des déchets
  
- La transition vers la génération IV
  - Scénarios possibles
  - Systèmes de génération III



# La physique des réacteurs

---

## ➤ Les activités de recherche associées

- Des études de systèmes nucléaires (filiale thorium, réacteurs à eau, ADS, MSFR,...)
  - Simulations (neutronique, thermique, hydraulique, matériaux), études sûreté, expériences
- Des études de scénarios (déploiement/arrêt du nucléaire, économie,...)
  - Simulations d'ensembles de systèmes (parc)
- Des activités en soutien à ces études:
  - Développement d'outils de calcul et couplage multi-physique, multi-échelle
  - Validations expérimentales
  - Mesures et évaluations de données nucléaires

# La physique des réacteurs

---

## ➤ Les activités de recherche principales au LPSC (13 permanents)

- Neutronique des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS) et la mesure de leur niveau de sous-criticité: expériences auprès du réacteur belge VENUS-F, transformé en maquette d'ADS (couplé à l'activité *accélérateurs* du LPSC): GUINEVERE
- Mesure de données nucléaires de fission sur le spectromètre Lohengrin à l'ILL: rendements de fission et rapports isomériques du  $^{241}\text{Pu}$ , à destination des évaluateurs (→ bibliothèques de données nucléaires, JEFF)
- Etude de systèmes nucléaires à eau innovants (cycle thorium) en alternative/dans l'attente de la GenIV (dimensionnement, évaluation de sûreté)
- Étude des systèmes complexes comportant des réactions nucléaires au sein d'un milieu fluide ou solide avec des transferts d'énergie et de masse, changements de phases et réactions chimiques
- Etudes de conception et méthodologie d'analyse de sûreté pour le Molten Salt Fast Reactor (MSFR)

# La physique des réacteurs

## ➤ Les activités de recherche principales au LPSC (13 permanents)

- Neutronique des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (ADS) et la mesure de leur niveau de sous-criticité: expériences auprès du réacteur belge VENUS-F, transformé en maquette d'ADS (couplé à l'activité *accélérateurs* du LPSC): GUINEVERE
- Mesure de données nucléaires de fission sur le spectromètre Lohengrin à l'ILL: rendements de fission et rapports isomériques du  $^{241}\text{Pu}$ , à destination des évaluateurs (→ bibliothèques de données nucléaires, JEFF)
- Etude de systèmes nucléaires à eau innovants (cycle thorium) en alternative/dans l'attente de la GenIV (dimensionnement, évaluation de sûreté)
- Étude des systèmes complexes comportant des réactions nucléaires au sein d'un milieu fluide ou solide avec des transferts d'énergie et de masse, changements de phases et réactions chimiques
- Etudes de conception et méthodologie d'analyse de sûreté pour le Molten Salt Fast Reactor (MSFR)

Développement d'outils de couplage multi-physique et multi-échelle associés

# La physique des réacteurs

---

## ➤ Travaux régulièrement auditionnés (échelle nationale) par:

- la Commission Nationale d'Evaluation, l'OPECST, l'Académie des Sciences, Comités interministériels d'Orientation et de Suivi de la Recherche sur l'Aval du Cycle (COSRAC) et sur les SYstèmes Nucléaires (COSSYN)...

## ➤ Financements, cadres:

- Programmes nationaux interdisciplinaires du CNRS (PACEN, NEEDS,...)
- Instituts Carnot (ANR) pour partenariats locaux: Institut Carnot Energies du Futur (Grenoble INP, CEA-Liten, UGA, U Savoie Mont-Blanc, CNRS, INRA)
- Cadre international EURATOM de la Commission Européenne: projets financés FP5 (MUSE), FP6 (EUROTRANS-IP), FP7 (FREYA, EVOL), H2020 (MYRTE, SAMOFAR)

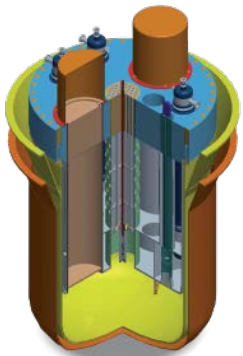
## Prospectives (1/2): physique des réacteurs

### ➤ Mesures de la réactivité d'un ADS

- Contribution au projet belge de construction de démonstrateur d'ADS MYRRHA (100 MW):
  - Tests de la procédure de mesure de réactivité sur GUINEVERE avec des conditions de faisceau plus représentatives d'un LINAC
  - Validation de la mesure de réactivité initiale du réacteur en puissance de faisceau réduite (faible cycle utile)



GUINEVERE



MYRRHA



### ➤ Application à destination des réacteurs critiques de puissance

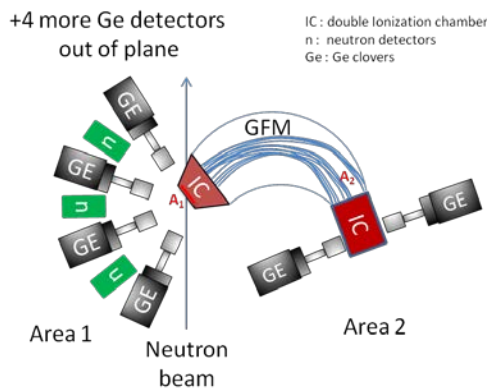
- Mesure de réactivité pendant l'approche sous-critique d'un réacteur de puissance (phase de chargement) avec une source externe
  - ➔ Projet « SALMON » Subcritical Approach for core Loading MONitoring
    - Court terme (2018-2019): Validation de la méthode avec programme test sur GUINEVERE avec le cœur de VENUS-F: spectre de neutrons rapide
    - Moyen-long terme (> 2019): possibilité de programme test pour réacteur thermique (retour à VENUS thermique), définition de sources de neutrons miniatures



# Prospectives (1/2): physique des réacteurs

## ➤ Mesures de données nucléaires et évaluation

- Mesure des rendements en masse (A) et en charge (Z) des actinides du cycle ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{245}\text{Cm}$ ,...) sur le spectromètre de masse Lohengrin (ILL)
- Evaluation des rendements de fission des actinides du cycle ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ) dans le cadre du projet européen d'évaluation de données JEFF (+ CEA)
- Développement de méthodes de mesure et d'analyse permettant d'extraire les observables de fission avec leur matrices de covariances de façon fiable pour l'amélioration des modèles: mesures multi-observables nécessaires:
  - Projet FIPPS (Fission Prompt Particles Spectrometer) à l'ILL (+ CEA): Spectro gamma haute résolution couplée à filtre magnétique de FF (conditionné à obtention de financement ILL fin 2017):



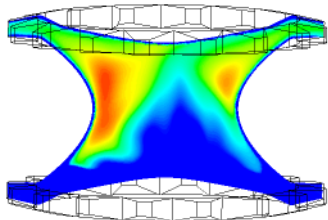
- Mesures multiparamétriques sur le processus de fission
- Développement d'analyse multivariée pour reconstruire la trace des fragments dans le filtre de FIPPS
- Long terme: installation possible de l'instrument sur source de neutrons rapides PEREN/GENEPI2 au LPSC pour poursuite des mesures de fission

## ➤ Etudes de réacteurs à eau innovants

- Elargissement de la méthodologie de conception:
  - Aux autres disciplines de la physique des réacteurs
  - À l'échelle de systèmes complets (circuits primaire et secondaire, échangeurs,...)
  - À l'échelle des scénarios associés (cycle du combustible, parcs symbiotiques,...)
- Poursuite de recherche d'alternatives réalistes à la génération IV:
  - Réacteurs actuels revisités
  - Innovations originales mais faisables (sous-modération, nouveaux matériaux,...)
  - Double objectif d'une conversion (rendement du combustible) et d'une sûreté accrues
- Recommandations de systèmes et scénarios prometteurs pour expertise économique (et vérification de leur compétitivité)

## ➤ Multi-physique expérimentale et numérique

- Études liées aux sels fondus à hautes températures pour des applications dans des systèmes nucléaires:



Modèle du couplage neutronique-thermo hydraulique du MSFR

- Conception et réalisation d'expériences orientées sur les aspects thermo-hydrauliques des fluides à hautes températures
- Développement de nouveaux modèles physiques pour le couplage neutronique-thermohydraulique –thermomécanique pour un caloporteur sel fondu

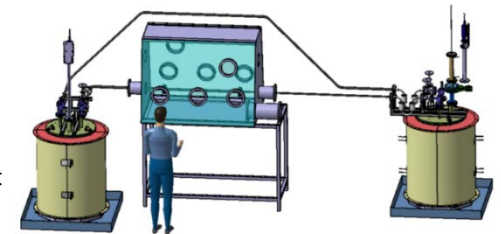
- Études d'applications possibles aux cibles utilisant des métaux liquides pour la production de neutrons (AB-BNCT)

- Études de systèmes nucléaires critiques utilisant des matières fissiles liquides ou solides (collaboration avec l'IRSN et EDF): développement d'outils et de méthodes de calcul pour des accidents de criticité et des accidents graves



Boucle FFFER

Plateforme SWATH-S (Project SAMOFAR)



## Prospectives (2/2): MSFR

### ➤ Pourquoi développer un nouveau type de réacteur nucléaire

- La demande énergétique mondiale va continuer à croître
- Le changement climatique impose de réduire l'usage des énergies fossiles
  - On suppose en 2050
    - Un retour à la production d'énergies fossiles de 2000
    - Une équipartition entre nucléaire et renouvelables

Source d'énergie primaire [Gtep] Données IEA	Production totale		Scénario 20 Gtep en 2050	Commentaires
	2000	2014		
Fossile (gaz, pétrole, charbon)	8	11,2	8	<b>Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> si capture et séquestration</b>
Biomasse Traditionnelle	1,1	1,4	2	Doublement
Hydraulique	0,22	0,35	0,6	Presque triplement
Nucléaire	0,68	0,66	4,7	<b>Facteur 7</b>
Nouveaux Renouvelables (solaire, éolien, biomasse, ...)	0,01	0,08	4,7	<b>Facteur 60 par rapport à 2014</b>
Total	10,0	13,7	20	<b>On est sur un chemin au-delà des 20 Gtep en 2050</b>

7 fois plus de nucléaire équivaut à la construction de plusieurs milliers de réacteurs  
**On a besoin d'un concept de réacteurs nucléaires socialement acceptable et accessible**

### ➤ Pourquoi utiliser un combustible liquide ?

Économie



- Homogénéité du combustible (pas de plan de chargement)

Flexibilité



- Chaleur produite directement dans le caloporteur
- Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes

Économie



- Une configuration pour optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité

Sûreté



- Une autre configuration pour un refroidissement passif
- Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur

Sûreté



- Pas de réserve de réactivité

Efficacité



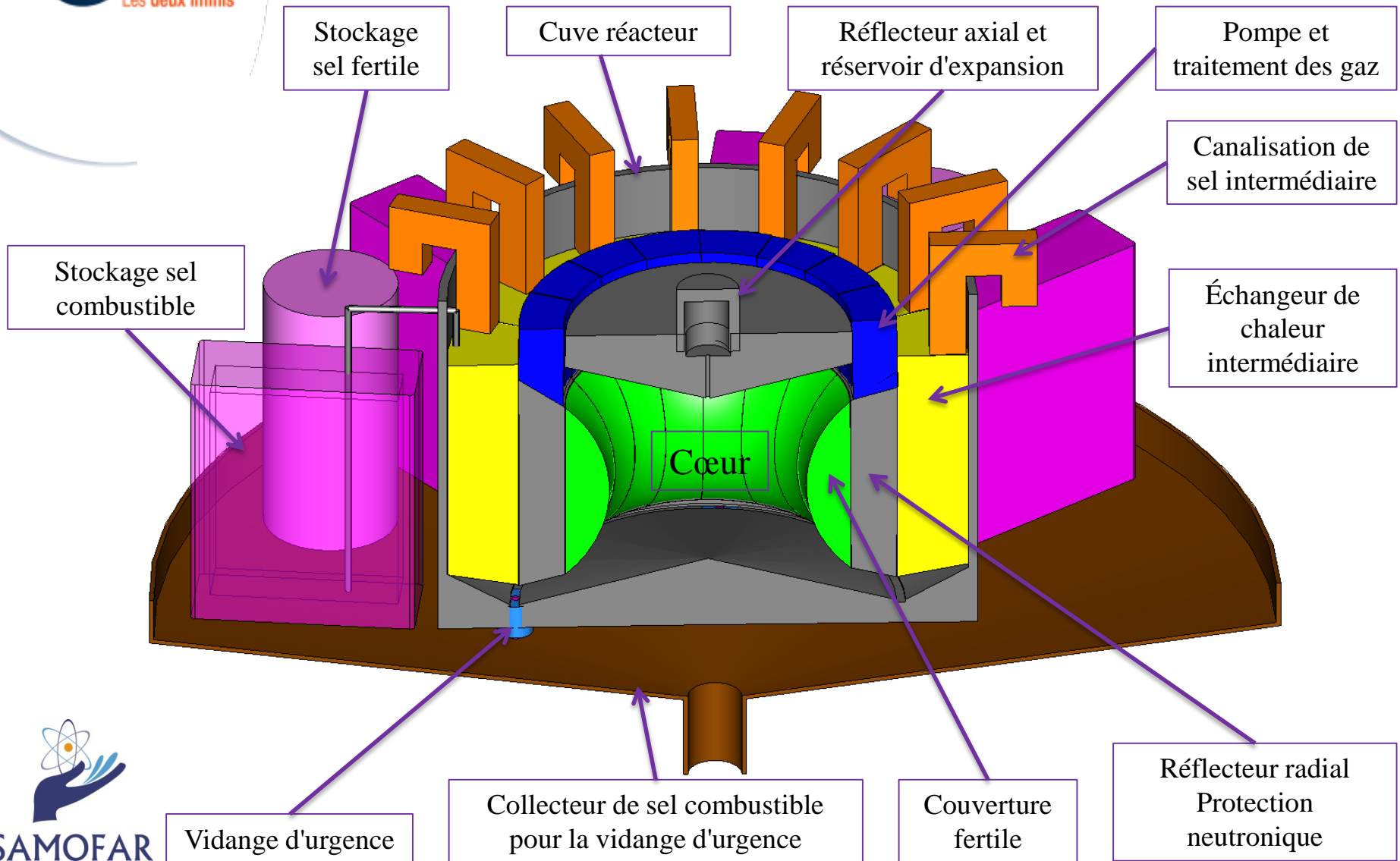
- Meilleure gestion des produits de fission neutrophages

Économie



- Besoin d'un seul inventaire fissile initial

# Prospectives (2/2): MSFR

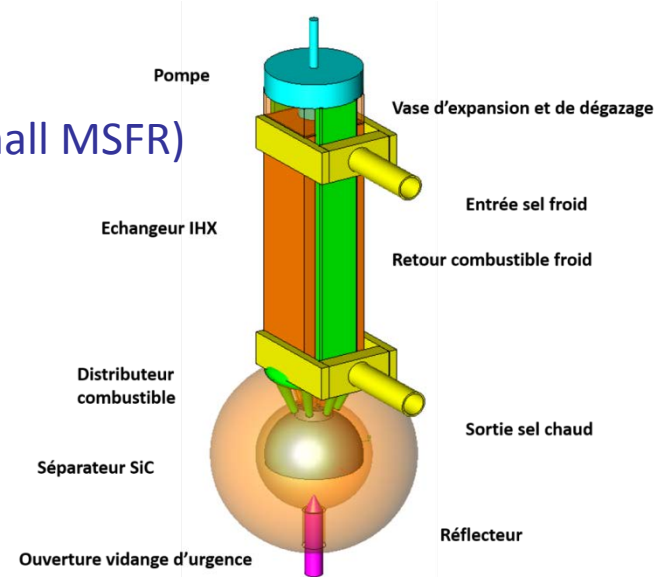


## Prospectives (2/2): MSFR

### ➤ Vers de petits réacteurs (S-MSFR pour Small MSFR)

Volume/10, Puissance/30

- Réduction des dégâts d'irradiation
  - Moins de chaleur volumique à extraire
  - Puissance résiduelle réduite
  - Traitement du combustible allégé
  - réacteur compact
  - Construction en série en usine
  - **Augmentation du nombre de sites ➡ augmentation des risques**
- 
- Analyse du cycle U-Pu en combustibles liquides
    - Valoriser le retour d'expérience sur ce cycle
    - Valoriser l'uranium appauvri stocké (300 000 t)
    - Une alternative pour les procédés de retraitement
    - **La régénération est plus difficile à atteindre**



## Conclusions

---

### ➤ **Nos recherches consistent à :**

- Explorer des voies innovantes pour la production d'énergie et la gestion des déchets nucléaires
- Faire de la science en amont, acquérir des connaissances fondamentales (modélisation)
- Développer des méthodes expérimentales innovantes basées sur les techniques de la recherche fondamentale (pilotage réacteur, données nucléaires, instrumentation, détection ...)

### ➤ **Notre rôle académique :**

- Participer aux grands axes de R&D nationaux et internationaux sur les déchets et les systèmes nucléaires du futur
- Savoir éclairer le débat sur les questions d'énergie de façon scientifique et transparente, expertise, analyse

### ➤ **Les enjeux au-delà de nos objectifs scientifiques :**

- Assurer la formation des étudiants qui travailleront dans la discipline
- Garder l'approche académique qui assure la transmission des savoirs associés à cette science (les enseignants-chercheurs de demain !)