

Activités de physique des réacteurs

A. Billebaud

Equipe Physique des Réacteurs: A. Bidaud, J. Blanco, N. Capellan, S. Chabod, V. Ghetta, S. Jamet, S. Julien-Laferrière, G. Kessedjian, E. Liatard, G. Mantulet, O. Méplan, A. Nuttin, P. Prévot, P. Rubiolo, C. Sage, M. Tano-Retamales, B. Voirin

Equipe MSFR: D. Gérardin, D. Heuer, J. Martinet, E. Merle



Plan

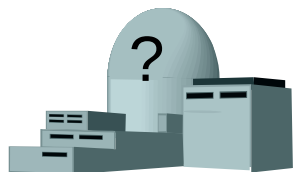
- **Présentation générale de la thématique et ses projets**
- **Activités de physique des réacteurs**
 - **Présentation des projets**
 - **Avancées de l'année 2017**
 - **Projections**
- **Conclusions**

Présentation générale de la thématique et ses projets

La thématique et ses projets

➤ 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**
- ... Ou **des alternatives**
- Les **scénarios de transition(s)**...
 - ...Vers la génération IV
 - ...Vers des systèmes de génération III
 - ... incluant recyclage ou incinération d'actinides



La thématique et ses projets

➤ La physique des réacteurs à l'IN2P3

- Thématique (DAS)
 - Physique nucléaire et applications
- Programme de recherche (1/6):
 - INET: Innovative Nuclear Energy production Techniques
 - ➔ Décliné sous 4 Master Projets "Physique"
 - ➔ 3 Master Projets "Radiochimie"
 - Les équipes du LPSC sont impliquées dans les 4 MP "Physique"
 - 2 responsables scientifiques de MP au LPSC
 - 7 projets sous responsabilité d'un membre du LPSC
- Création en 2017-2018 d'un GDR pour la thématique:
"Sciences Nucléaires pour l'Energie et l'Environnement" (SciNEE)
- Nos collaborateurs en France et à l'étranger:
 - locaux: SIMAP/EPM, G-Scop, GAEL,...
 - CEA, IRSN, industriels (AREVA NP, EDF), laboratoires européens dans le cadre d'EURATOM, Kurchatov Institute (Russie), FIGES et TUBITAK (Turquie)

La thématique et ses projets

➤ Les “Master projects” de l’IN2P3

- **ASSURANCE** (IPNO)

Analyses de **S**ystèmes et de **S**cénarios Utilisant les **R**éacteurs à eau et haute conversion par **A**nticipation d’un **N**ouveau **C**ontexte **E**nergétique

- Simulations de systèmes et d’évolution d’ensembles de systèmes (scénarios), (projets SIRIUS, MOISE, MEN)

- **MSFR** (LPSC)

Molten **S**alt **F**ast **R**eactor

- Etude d’un concept de réacteur à combustible liquide de génération IV: rupture technologique (projet Conception et analyse de sûreté du MSFR)

- **GUINEVERE** (LPSC)

Generator of **U**ninterrupted **I**ntense **N**eutrons at the **V**enus lead **R**Eactor

- Expériences en soutien aux réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur (projets FREYA, MYRTE,...)

- **OPALE** (IPHC)

Des **d**onnées **e**x**p**ériment**a**les à l’**é**va**l**uation pour les réact**e**urs

- Développement de méthodes de mesure et d’analyse permettant d’extraire les observables de fission avec leur matrices de covariances pour l’amélioration des modèles: mesures multi-observables nécessaires (projets Lohengrin, FIPPS,...)

Activités de physique des réacteurs

ASSURANCE/SIRIUS: bilan de l'année 2017

➤ MP ASSURANCE

- **SIRIUS**: Simulation of Innovative Reactors Improving Uranium Savings and Safety margins (LPSC):
 - Etablir un ensemble d'outils de simulation pour le design et le fonctionnement des réacteurs
 - Application à la conception de réacteurs à eau légère innovants répondant à différents objectifs
 - Quantification des erreurs de modélisation simplifiée et comparaison aux erreurs induites par les données nucléaires
- Etude de systèmes nucléaires à eau innovants (cycle thorium) en alternative/dans l'attente de la Gen IV (dimensionnement, évaluation de sûreté): thèse de P. Prévot

➔ Bilan 2017:

- 1 article sur le raffinement de méthodes de calcul de transitoires (ex: éjection de grappe, sûreté), P. Prévot et al.
- 1 article conférence Global 2017 sur première étude de conception menée de A à Z, P. Prévot et al.
- Calculs de sensibilité des paramètres cinétiques (séjour A.Bidaud Berkeley)

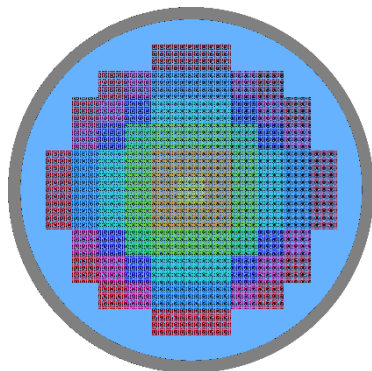
ASSURANCE/MOISE: bilan de l'année 2017

➤ MP ASSURANCE

- **MOISE**: Modélisation et Ouverture Interdisciplinaire des Scénarios Electronucléaire (Subatech):
 - Physique de la transmutation (lien avec SIRIUS)
 - Caractérisation des scénarios de transition
 - Ouverture interdisciplinaire: rôle et usage des scénarios nucléaire dans la transition énergétique (sociologie, économie)
 - Etude de scénarios nucléaires ou énergétiques globaux avec objectifs fixés: développement d'outils pour cibler les paramètres clés: compétition et complémentarité entre technologies de l'énergie : thèse G. Mantulet en collaboration avec laboratoire GAEL (Grenoble Applied Economics Laboratory)
- ➔ **Bilan 2017:**
- Début d'une nouvelle thèse GAEL/LPSC (G. Mantulet, Carnot Energies du Futur: projet PROSPEN)

➤ SIRIUS/MOISE: systèmes et scénarios

- 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 (nouveaux modes de pilotage)
 - Innovations originales mais faisables (sous-modération, nouveaux matériaux,...)
 - Double objectif d'une conversion (rendement du combustible) et d'une sûreté accrues
- Recommandations de systèmes pour des scénarios divers incluant une expertise économique (et vérification de leur compétitivité)

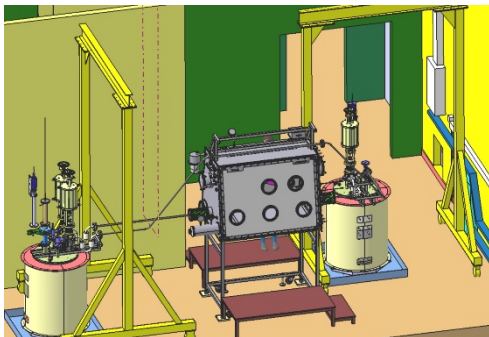


Cœur SMR (P. Prévot)

ASSURANCE/MEN: bilan de l'année 2017

➤ MP ASSURANCE

- **MEN:** Multi-physique Expérimentale et Numérique (LPSC)
 - Développement d'outils de couplage multi-physique
 - Validations expérimentales
- 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
- Développement de modèles multi-physique de caloporteur sels fondus à haute température, et validation expérimentale: thèse de M. Tano-Retamales
- Création de l'installation d'études expérimentales SWATH (Salt at Walls: Thermal exChanges): implication serv. *mécanique et détecteurs & instrum*)
- Post-doc sur accidents graves en REP (S. Jamet, EDF)



Plateforme SWATH-S (Project SAMOFAR)

➔ Bilan 2017:

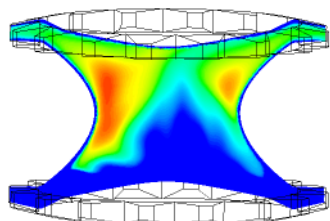
- Fin de la construction et mise en service de SWATH
- Début de validation expérimentale de nouveaux modèles (solidification, publications en cours)
- Début d'une nouvelle thèse LPSC/IRSN (J. Blanco) : couplage thermo-hydraulique/neutronique pour les accidents de criticité

ASSURANCE/MEN: projections

➤ MEN: projections

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

- 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



Modèle du couplage neutronique-thermo hydraulique du MSFR



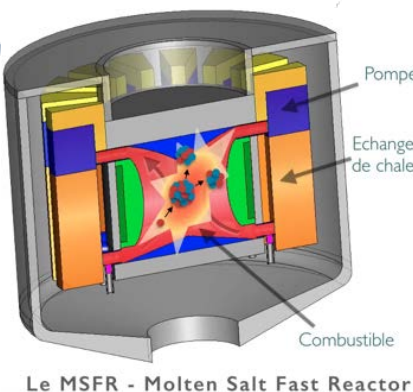
Boucle SWATH

- 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

MSFR: bilan de l'année 2017

➤ MP MSFR

- **Conception et analyse de sûreté du MSFR** (LPSC)
- Définition de l'approche de sûreté du MSFR (projet SAMOFAR, H2020) en collaboration avec l'IRSN
- Etudes paramétriques de neutronique (cycle du combustible, chaleur résiduelle) et multi-physiques (calculs d'accidents, fonctionnement normal)
- Optimisation physique du système en tenant compte des exigences de sûreté à la conception
- Développement puis utilisation d'un simulateur de pilotage afin d'identifier les procédures d'opération du réacteur (démarrage, arrêt, suivi de charge)
- Définition d'un démonstrateur et des étapes de R&D



Le MSFR - Molten Salt Fast Reactor

➔ Bilan 2017

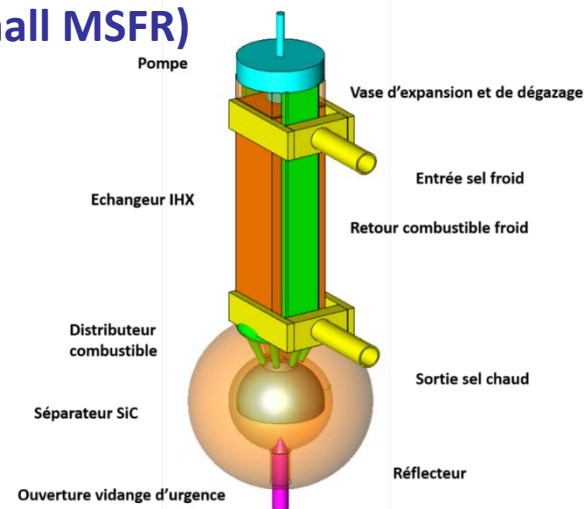
- Application de l'approche de sûreté au MSFR en collaboration avec Politecnico di Torino, identification des principaux initiateurs d'accidents/incidents: thèse de D. Gérardin (articles aux conf. Fast Reactors 2017 et PSA2017)
- Définition des échangeurs de chaleur (collab. AREVA NP Lyon) et intégration dans le code système statique couplé à un algorithme génétique
- Dimensionnement du refroidissement du réservoir de vidange d'urgence
- Procédure de démarrage du réacteur prenant en compte les incertitudes, article à la conférence ICAPP 2017
- **Début d'une nouvelle thèse LPSC/AREVA NP: Small-MSFR (voir prospectives) (J. Martinet, IDEX UGA + AREVA NP)**

MSFR: projections

- MSFR: projections
- Design de petits réacteurs (S-MSFR pour Small MSFR)

Volume/10, Puissance/30

- Intérêt:
- 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



Mais augmentation du nombre de sites ➔ augmentation des risques

- Analyse du cycle U-Pu en combustibles liquides

- Intérêt:
- 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

GUINEVERE: bilan de l'année 2017

➤ MP GUINEVERE

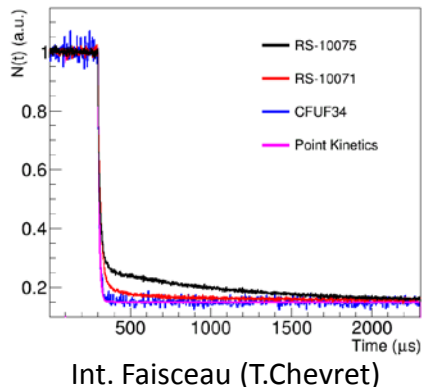
- **FREYA**: Fast Reactor Experiments for hYbrid Applications (LPSC)
- Projet européen EURATOM FP7: 2011-2016
- Mesure du niveau de sous-criticité d'un réacteur sous-critique piloté par accélérateur: expériences auprès du réacteur belge VENUS-F, transformé en maquette d'ADS (couplé à l'activité **accélérateurs** du LPSC): GUINEVERE
- **MYRTE**: MYRRHA Research and Transmutation Endeavour (LPSC)
- Projet européen EURATOM H2020: 2015-2019
- Validation de la mesure de sous-criticité pour un coeur plus représentatif de MYRRHA, optimisation des emplacements des détecteurs



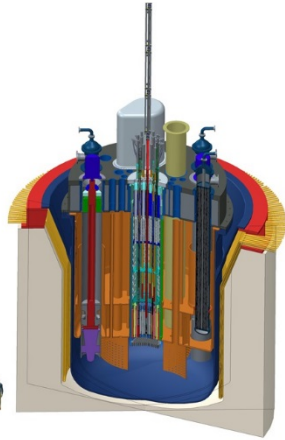
GUINEVERE

➔ Bilan 2017:

- 1 thèse codirigée au LPSC soutenue fin 2016: mesures de sous-criticité d'un ADS dans les interruptions de faisceau programmées (T. Chevret)
- Fin des prises de données projet MYRTE (analyse en cours)
- Publications: 5 articles de conférences, 2 en préparation
- Élaboration et proposition d'un programme exp complémentaire ➔ intégré dans accord SCK-CNRS MYRRHA-100MeV



GUINEVERE: projections



MYRRHA

➤ Mesures de la réactivité d'un ADS

- Contribution au projet belge de construction de démonstrateur d'ADS MYRRHA (100 MW): accords MYRRHA-100 MeV (CNRS-SCK): 2018-mi 2019
- Tests de la procédure de mesure de réactivité sur GUINEVERE avec paramètres temporels de faisceau plus représentatifs du LINAC de MYRRHA
- Validation de la mesure de réactivité initiale du réacteur en puissance de faisceau réduite (faible cycle utile)

➤ 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 (IN2P3/IRSN) > 2019
- ➔ Projet « SALMON » Subcritical Approach for core Loading MONitoring
- Validation de la méthode avec programme test pour réacteur thermique (retour à VENUS thermique), définition de sources de neutrons miniatures
- Financement réacteur à rechercher (partenaire ?)
- ➔ Intégration dans projet structurant NEEDS 2018-2019 (montage en cours) avec d'autres expériences en réacteurs

OPALE: bilan de l'année 2017

➤ MP OPALE

- **Lohengrin:**

- Mesure de rendements en masse et isotopiques ^{239}Pu , ^{241}Pu auprès du spectromètre Lohengrin à l'ILL (thèse S. Julien-Laferrrière, CEA)

Objectif: améliorer les évaluations des rendements et les spectres de gamma prompts par noyau fissionnant

➔ Bilan 2017:

- Début d'une nouvelle thèse LPSC/CEA sur évaluation des rendements de fission des actinides du cycle (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu) dans le cadre du projet européen d'évaluation de données JEFF (B. Voirin)

- **FIPPS: Fission Prompt Particles Spectrometer (LPSC)**

- Spectro gamma haute résolution couplée à filtre magnétique de Fragments de Fission (GFM) à l'ILL: LPSC impliqué dans design du filtre (**pôle accélérateurs** du LPSC) et instrumentation

➔ Bilan 2017:

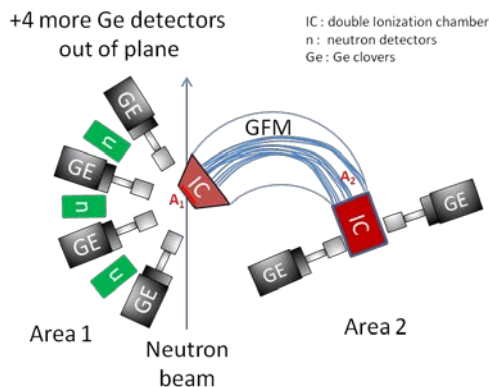
- Evaluation du projet de GFM par rapporteurs externes en octobre 2017 ➔ itération sur le design de l'aimant mais avis positif: attente de décision de financement du dir. ILL début 2018 (*cf. projections*)



OPALE: projections

➤ Mesures de données nucléaires et évaluation

- Mesure des rapports isomériques des FF comme sonde du processus de fission pour la validation des modèles de désexcitation (FIFRELIN, GEF ...) avec CEA
- Projet FIPPS à l'ILL (+ CEA), si financement:
 - 1 an de design industriel de l'aimant supra (ILL + indus)
 - 2 ans de construction (aimant + dvpt instrumentation)
 - 6 mois commissioning + 6 mois premières manip/ calibration ...
- Mesures multiparamétriques (spectro γ , A, Z, E^* , $v...$) sur le processus de fission
- Développement d'analyse multivariée pour reconstruire la trace des fragments dans le filtre de FIPPS (GEANT-4)
- Long terme: installation possible de l'instrument sur source de neutrons rapides GENEPI2 au LPSC (plateforme GENESIS) pour poursuite des mesures de fission



Conclusions

➤ 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)
- **AIEA**, Forum **GEN IV**

➤ Rôle académique de nos travaux:

- Participer aux grands axes de R&D nationaux et internationaux sur les déchets et les systèmes nucléaires du futur
 - *(travaux régulièrement auditionnés par la Commission Nationale d'Evaluation, l'OPECST, l'Académie des Sciences, Comités interministériels d'Orientatation et de Suivi de la Recherche sur l'Aval du Cycle (COSRAC) et sur les SYstèmes Nucléaires (COSSYN)...)*
- 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 !)