



# PEPR Science Amont Nucléaire de Fission (SCIAM)

Projet 4 : Données de base matériaux sous irradiation

Olivier Doyen (CEA), Nathalie Moncoffre (CNRS)

# 1. Présentation générale du projet - Enjeux actuels

**Contexte :** Inscription de l'énergie nucléaire dans la stratégie nationale de transition énergétique

- ➔ opération prolongée des réacteurs actuels à 60 ans ou au-delà
- ➔ construction de nouvelles centrales
- ➔ émergence de réacteurs innovants – nouvelles technologies

**Conditions extrêmes**

**La recherche amont** sur les effets de l'irradiation des matériaux des réacteurs est cruciale



*Pastille de combustible UO<sub>2</sub>*

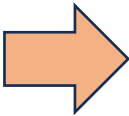
## **Objectifs :**

Réaliser des études à caractère fondamental **pour acquérir de nouvelles données de base sur les matériaux**

- **Mieux comprendre les processus d'évolution des matériaux en conditions d'irradiation**
- Mieux maîtriser les conditions d'irradiation ionique capables de contribuer à la qualification des matériaux en réacteur
- Mieux comprendre les **effets de radiolyse aux interfaces** et **l'évolution des matériaux en fonctionnement réacteur** et en **conditions d'entreposage**

## Pourquoi ces données physiques ?

- Les effets des **variations de flux neutroniques** sur les propriétés des matériaux
- Le rôle de l'irradiation sur la **distribution des défauts** et la redistribution des **espèces chimiques**
- **Le rôle des solutés** sur la formation des défauts et des hétérogénéités chimiques sous irradiation :  
 perspectives de nouveaux matériaux qui répondront mieux aux exigences des nouvelles conditions d'exploitation
- Concentrations des espèces radiolytiques sous radiolyse
- Evolution du film passif sous radiolyse
- Les cinétiques de corrosion sous radiolyse



### WP1 - Utilisation des ions pour comprendre et prédire les effets d'irradiation en réacteur

**Tâche 1 :** Connaissance du dommage primaire et paramétrisation des termes sources dans les modèles

**Tâche 2 :** Microstructures d'alliages ferritiques irradiés dans des conditions maîtrisées en fonction de la particule incidente (ions, neutrons)

### WP2 - Interfaces sous irradiation

**Tâche 1 :** Interfaces acier/solution

**Tâche 2 :** Interfaces combustible/solution

## 2. Organisation des activités de recherche sur cette thématique au niveau national

### La communauté qui étudie les matériaux sous irradiation s'est structurée au CNRS en 2009

2009 : Réseau CNRS **EMIR** (Etude des Matériaux sous IRradiation) → Etudes utilisent des irradiations avec des particules chargées (ions, électrons).

2014 : EMIR devient la **Fédération de Recherche EMIR**

2019 : EMIR devient EMIR&A (& l'Analyse) → Analyse par faisceaux d'ions et radiolyse

2021 : **EMIR&A** est aussi une **Infrastructure de Recherche**



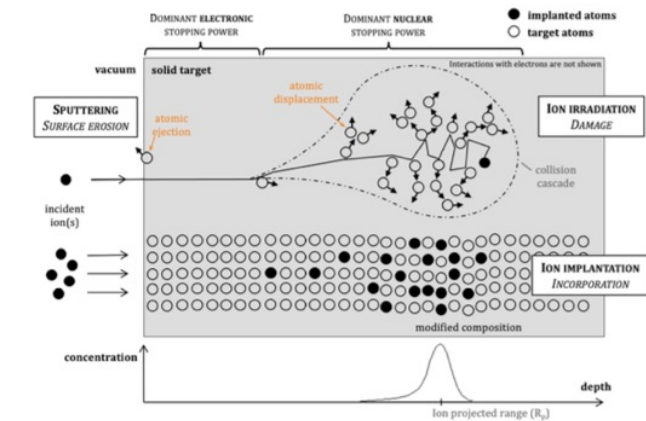
Structuration transverse au CNRS (INP, INC, IN2P3) – actions communes (réseau technique RASTA, IBAF, EMIRUM)

2018 : création du **GDR SciNEE** (Sciences Nucléaires pour l'Energie et l'Environnement)

**dont le pôle 4 est dédié aux matériaux en conditions extrêmes**

Pour obtenir ces données de bases : particules chargées accélérées  
→ simuler les effets des neutrons et le processus de radiolyse

- Contrôle précis des conditions d'irradiation (ion, énergie, dose, température)
- **Découplage** des différents paramètres d'endommagement → compréhension des mécanismes
- Matériaux modèles
- Simplification des expériences (pas de matière active, gain de temps)
- Couplage expériences – modélisation multiéchelle
- Mettre en évidence la limite des modèles existants et **améliorer la capacité prédictive des modèles**



Complémentarité des équipes  
Synergie

Liens étroits des équipes autour des plateformes d'irradiation et d'analyse

**emir&a**  
Réseau national d'accélérateurs  
pour l'irradiation et l'analyse des  
molécules et matériaux

## Le projet structurant NEEDS RAISIN (2020-2024) → acquérir des données de base importantes

**Objectif : Coupler irradiations aux particules chargées (ions, électrons) et modélisation pour comprendre et prédire les effets d'irradiations aux neutrons**

- Basé sur une forte interaction entre **modélisation et expériences**, sur l'étude de **matériaux modèles**
- **Développements de techniques de caractérisation**, de méthodologies innovantes et de modélisation
- **Etroite collaboration CNRS/Univ avec le CEA, EDF** au travers du labo commun EM2VM : suivi des études, intégration des résultats dans leur démarche de R&D

Chambre Triple  
faisceaux  
JANNuS Saclay



### Résultats et développements marquants :

- Mise en évidence par **calculs de DM** de la formation de **cascades de collisions atypiques** (défauts plus nombreux et amas lacunaires plus gros) dans aciers austénitiques
- **Développement de dispositifs de recuits de résistivité**
- **Mesures de coefficient de diffusion** à basses températures (440°C) et sous irradiation (RT, 440°C) dans Ni/NiCr
- **Ségrégation chimique sous irradiation** des éléments d'alliage selon la nature des particules incidentes (**ions lourds, protons, neutrons**) dans Fe-15Cr-NiSiP (0,1 dpa et 300°C)
- **Appauvrissement en Cr** dans les régions proches de joints de grains (SAT+MET)

### Matériaux pour la fusion :

Certains acteurs impliqués dans des projets FR FCM, EUROfusion

Ex : évolution de la microstructure (stabilité, gonflement...) de matériaux (aciers ODS, W ..) sous irradiation

→ **les connaissances acquises sur les matériaux pour la fusion utiles pour la fission**

## Le PEPR SCIAM s'intègre, renforce et dynamise cette structuration

- Autour des plateformes d'accélérateurs (ions, électrons) pour l'irradiation et l'analyse
- Avec des **équipements partagés**, ouverts à d'autres thématiques
- Renforce et développe les **collaborations CNRS/CEA**
- Synergie profitable pour la mise en place de projets collaboratifs

Ex : **Projet Européen CONNECT NM** sur l'étude des matériaux nucléaires

8 projets acceptés/17 avec équipes du CNRS/univ

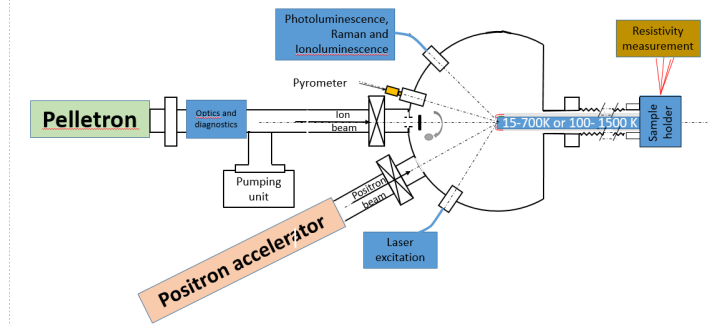


### 3. Présentation scientifique - Sujets de recherche

Structuration du projet en 2 WP :

#### WP1 - Utilisation des ions pour comprendre et prédire les effets d'irradiation en réacteur

- **Tâche 1 : La connaissance du dommage primaire et la paramétrisation des termes sources dans les modèles**
- **Thèse CNRS/CEMHTI** : partie expérimentale – caractérisation des défauts ponctuels et petits amas – alliages métalliques, 2026-2029, M. F. Barthe
- **Post-doc CNRS/UMET** : Modélisation par Monte Carlo cinétique d'Objets (OKMC) de l'évolution de la microstructure sous irradiation d'alliages modèles représentatifs des aciers de cuve pour différents types de particules : ions, neutrons, 2027, *collaboration avec EDF*, C. Becquart
- **Thèse CEA/ISAS/SRMP** : Expériences et analyses de recuit de résistivité pour l'étude des défauts ponctuels dans des alliages Ni-Fe à structure fcc après irradiation aux protons à basse température, 2027-2030, T. Bilyk.



**Projet CAMOPED : Caractérisation in situ et operando (sous irradiation et température) des défauts et structure dans les matériaux par des mesures de spectroscopie d'annihilation de positons (PAS), recuit de résistivité, de photo/iono-luminescence (PL/IL) et Raman**



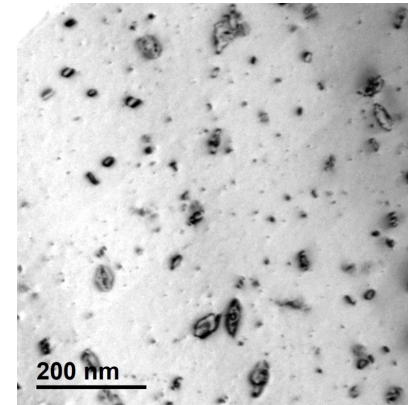


➤ **Tâche 2 : Microstructures des alliages ferritiques irradiés dans des conditions maîtrisées en fonction de la particule incidente (ions, neutrons)**

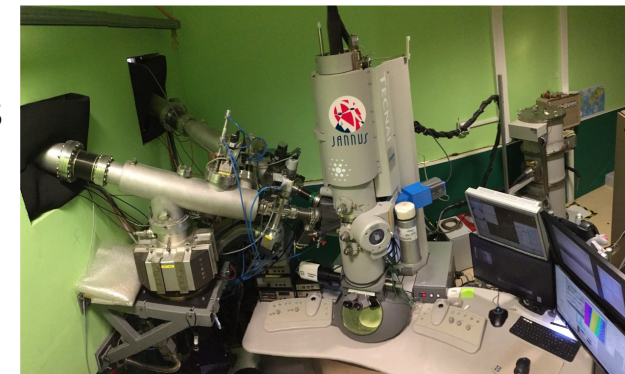
- **Thèse CNRS/GPM** : quantification de l'influence des différents solutés sur l'évolution des microstructures et le durcissement sous irradiation - Comparaison des effets des ions et des neutrons, 2027-2030,  
*collaboration IJCLab / MOSAIC, B. Radiguet*

- **Thèse CNRS/IJCLab** : Impact des paramètres d'irradiation sur la formation de la phase alpha prime dans les aciers renforcés par dispersion d'oxydes (ODS), 2027-2030,  
*collaboration avec le CEA/ISAS (M. Loyer-Prost), S. Jublot Leclerc, A. Gentils*

- **Post-doc CEA/ISAS/SRMP** : Stabilité de phases sous irradiation d'alliages ferritiques irradiés de manière cumulative aux ions et aux neutrons, 2028-2030, E. Meslin, F. Amann.



*Observation des boucles de dislocation formées sous irradiation*  
*Thèse Lisa Lefort (2025)*



*MET in situ*  
*MOSAIC, (IJCLab)*

**mosaic** **ijclab**  
Irène Joliot-Curie  
Laboratoire de Physique  
des 2 Infinis

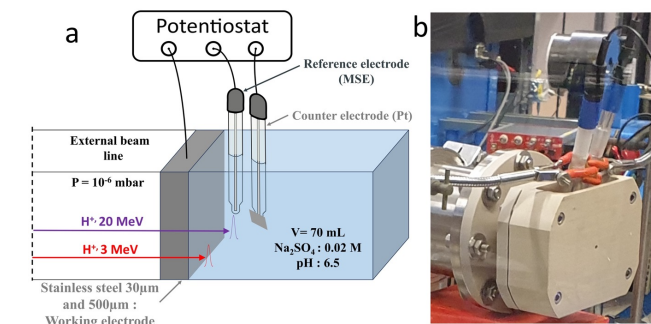
## WP2 - Interfaces sous irradiation

### ➤ Tâche 1 : Interfaces acier/solution

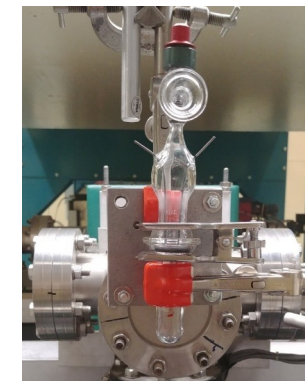
- **Thèse CNRS/IP2I : Modélisation** des mécanismes de corrosion de l'acier inoxydable 316L sous radiolyse dans les REP, par couplage de dynamique moléculaire et de simulations Monte Carlo, 2026-2029, Y. Pipon, C. Panetier
- **Post-doc IP2I/NIMBE** : Discrimination des produits de radiolyse les plus influents, créés sous irradiation pulsée, pour la compréhension des mécanismes de corrosion d'un acier inoxydable 2027, S. Le Caër, N. Bérerd

### ➤ Tâche 2 : Interfaces combustible/solution

- **Thèse CNRS/ICSM/IP2I** : Etude de la lixiviation des combustibles SIMOX (U-Th) et de l'influence de l'irradiation et des phénomènes de radiolyse. Préparation des matériaux modèles. Caractérisation de l'interface en évolution et suivi *operando* des interfaces solide/liquide, 2027-2030, collaboration avec l'ISEC, N. Dacheux, C. Gaillard



Dispositif d'irradiation in situ  
Interface solide/électrolyte **IP2I**  
LES 2 INFINIS  
LYON



Cellule multifonctions  
couplée à l'accélérateur  
ALIENOR



## PROJET 4 - Données de base matériaux sous irradiation

Coordinateurs : Olivier Doyen (CEA), Nathalie Moncoffre (CNRS)

### Ressources Humaines

**Personnel permanent**  
**215 p.mois**

**Personnel non-permanent**  
**288 p.mois**



6 Thèses



5,5 ans Post-docs

**Total : 503 p.mois**

### Budget & Moyens

**2106 K€ (dont 67% RH)**

#### Plateformes d'irradiation

**et d'analyse** : MOSAIC-Orsay à IJCLab, JANNuS Saclay au CEA, ALIENOR au NIMBE (CEA-CNRS), Pelletron et Accélérateur de positons au CEMHTI, GENESIS au GPM (SAT, MET, MEB-FIB sur actifs)

**Ressources informatiques** : Ferme de calculs de l'IP2I (IP2I HTC farm), Serveurs du Pôle Scientifique de Modélisation Numérique - ENS Lyon, GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), Université de Lille et EDF

### Laboratoires

#### Partenaires :

- CEMHTI, ICSM, IJCLab, IP2I, GPM, LP2I, NIMBE, UMET
- CEA ISAS, ISEC
- 1 thèse, 1 post-doc en co-encadrement
- 2 thèses en collaboration avec CEA
- Equipements de caractérisation partagés

**Plateformes d'irradiation partagées (EMIR&A) :** 

MOSAIC (IJCLab), JANNuS-Saclay (CEA/ISAS), Pelletron (CEMHTI), ALIENOR (NIMBE)