

# IBAF 2024

ion Beam Applications Francophone

**Lège Cap-Ferret**

**1 – 4 octobre 2024**



**Société Française du Vide (SFV)**  
19 rue du Renard – 75004 Paris – [sfv@vide.org](mailto:sfv@vide.org)  
Tél. : 01 53 01 90 30 – [www.vide.org](http://www.vide.org)

## COMITE

Philippe <b>BARBERET</b> <i>Président</i>	LP2iB, Univ. Bordeaux	Gradignan
<u>Membres</u>		
Lucile <b>BECK</b>	LMC14, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Pascal <b>BERGER</b>	IRAMIS, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Julien <b>COLAUX</b>	LARN, UNamur	Namur (BE)
Frederico <b>GARRIDO</b>	IJCLab, Univ. Paris-Saclay	Orsay
Gaëlle <b>GUTIERREZ</b>	JANNuS, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Gweltaz <b>HIREL</b>	SFV	Paris
Denis <b>JALABERT</b>	IRIG, CEA Grenoble	Grenoble
Hicham <b>KHODJA</b>	IRAMIS, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Nathalie <b>MONCOFFRE</b>	IP2I Lyon	Villeurbanne
Dominique <b>MULLER</b>	ICube, Univ. Strasbourg	Strasbourg
Claire <b>PACHECO</b>	C2RMF	Paris
Stéphanie <b>PELLEGRINO</b>	INSTN, CEA Saclay	Gif-sur-Yvette
Thierry <b>SAUVAGE</b>	CEMHTI	Orléans
Ian <b>VICKRIDGE</b>	INSP, Sorbonne Univ.	Paris

© Editions SFV 2024

19 rue du Renard – 75004 Paris

Les textes de ce volume sont la propriété exclusive de la Société Française du Vide.  
Toute reproduction est interdite sans son accord.

Les Editeurs déclinent toute responsabilité relativement aux erreurs ou omissions qui pourraient se produire dans l'impression de ce volume.

## **EDITORIAL**

Les dixièmes journées Ion Beam Applications Francophone (IBAF), ont lieu cette année du 1<sup>er</sup> au 4 octobre 2024 dans la région bordelaise. Cette édition est organisée par le LP2I Bordeaux (anciennement CENBG) et se déroulent au VVF Cap Ferret à Lège.

Ces journées portent sur tous les aspects liés à la production et à l'exploitation de faisceaux de particules chargées dans le domaine du MeV, typiquement issues d'accélérateurs électrostatiques ou des petits cyclotrons. Une grande partie des développements et des applications des méthodes d'analyse et/ou d'irradiation par faisceaux d'ions sont représentées : les instruments et techniques des faisceaux d'ions, la physique des interactions ions-matière, l'analyse et la modification de matériaux, les faisceaux d'ions appliqués aux sciences de la vie, de la Terre et de l'environnement et les sciences du patrimoine

Au-delà des aspects scientifiques, IBAF est l'occasion pour la communauté francophone de se retrouver et d'échanger dans une atmosphère constructive et conviviale.

Nous sommes très heureux de vous accueillir pour IBAF 2024 et nous vous souhaitons une excellente conférence.

**Le Comité IBAF**

# Programme des conférences

## MARDI 1<sup>ER</sup> OCTOBRE 2024

13:00 Accueil des participants et enregistrement

14:00 Ouverture des Journées

**Philippe Barberet**, *Président du Comité IBAF 2024*

**Chair : N. Moncoffre**

14:20 **INV-1 - Dégâts d'irradiation et matériaux pour la fusion : opportunités et défis**  
**Conférence Invitée**

**R. Schäublin**

*LMPT, ETH Zürich (CH)*

15:00 **#19 - Influence du flux de particules sur la nature des boucles de dislocation formées dans le nickel**

**L. Lefort<sup>1</sup>, M. Loyer-Prost<sup>2</sup>, T. Jourdan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Univ. Paris-Saclay, CEA, Gif sur Yvette (FR)*

<sup>2</sup> *CEA, SRMP, Gif sur Yvette (FR)*

15:20 **#21 - Croissance d'un film ALD d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> étudiée par analyse du faisceau d'ions (IBA) et spectroscopie photoélectronique à rayons X : vers la compréhension de l'influence des impuretés sur la structure électronique**

**B. Xia<sup>1</sup>, J.J. Ganem<sup>1</sup>, E. Briand<sup>1</sup>, S. Steydli<sup>1</sup>, A. Wanda Baron-Wiecheć<sup>2</sup>,**

**I. Vickridge<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Sorbonne Univ., Paris (FR)*

<sup>2</sup> *Guangdong Technion-Israel Institute of Technology, Paris (FR)*

15:40 **#26 - Utilisation de différents scénarios d'irradiation aux ions pour simuler la désintégration alpha : application au cas de vitrocéramiques dopées en 241AM**

**S. Miro<sup>1</sup>, N. Sellami<sup>1</sup>, S. Peugeot<sup>1</sup>, G. Jouan<sup>1</sup>, G. Gutierrez<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *CEA, DES, ISEC, DE2D, Univ. Montpellier, Marcoule, Bagnols-sur-Cèze (FR)*

<sup>2</sup> *CEA, DES, ISAS, DRMP, Univ. Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette (FR)*

16:00 **Pause (30')**

## MARDI 1<sup>er</sup> OCTOBRE 2024

### Chair : T. Sauvage

- 16:30      **#25** - Vers une meilleure compréhension des phénomènes de corrosion sous irradiation  
**J-B. Pruvo<sup>1</sup>, B. Bernard<sup>1</sup>, S. Radchi<sup>1</sup>, F. Balbaud<sup>2</sup>, J.L. Béchade<sup>1</sup>, G. Gutierrez<sup>1</sup>,  
F. Nozais<sup>1</sup>, D. Bossu<sup>1</sup>, H. Martin<sup>1</sup>, C. Cabet<sup>3</sup>, M. Loyer-Prost<sup>3</sup>**  
<sup>1</sup> Univ. Paris-Saclay, CEA, SRMP, Gif-sur-Yvette (FR)  
<sup>2</sup> Univ. Paris-Saclay, CEA, SRCCM, Gif-sur-Yvette (FR)  
<sup>3</sup> Univ. Paris-Saclay, CEA, SRMPA, Gif-sur-Yvette (FR)
- 16:50      **#04** -Contribution à l'étude de l'oxydation du titane et de ses alliages à l'aide de  
l'analyse par faisceaux d'ions  
**L. Lavisse<sup>1</sup>, B. Berger<sup>2</sup>, V. Optasanu<sup>1</sup>, M.C. Marco De Lucas<sup>1</sup>, T. Sauvage<sup>3</sup>,  
B. Diallo<sup>3</sup>, S. Sorieul<sup>4</sup>, J. Jouve<sup>4</sup>, T. Montesin<sup>1</sup>, J.M. Jouvard<sup>1</sup>, J.B. Mitchell<sup>5</sup>,  
J.L. Legarrec<sup>6</sup>, F. Herbst<sup>1</sup>, O. Heintz<sup>1</sup>, N. Geoffroy<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> ICB, CNRS-Univ. Bourgogne, Dijon (FR)  
<sup>2</sup> Univ. Paris-Saclay, CEA, CNRS, NIMBE, Gif-sur-Yvette (FR)  
<sup>3</sup> CEMHTI, Univ. Orléans (FR)  
<sup>4</sup> LP2IB, Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux (FR)  
<sup>5</sup> MERL-Consulting SAS, Rennes (FR)  
<sup>6</sup> Univ Rennes 1, Inst Phys Rennes, Rennes (FR)
- 17:10      Présentation flash Posters et exposants
- 18:30      *Cocktail d'accueil*
- 19:30      *Dîner*

## MERCREDI 2 OCTOBRE 2024

Chair : D. Jalabert

- 09:00 **INV-2** - Croissance de matériaux 2D sur grandes surfaces par épitaxie de Van der Waals  
**Conférence Invitée**  
**M. Jamet<sup>1</sup>, C. Jégo<sup>1</sup>, K. Abdukayumov<sup>1</sup>, Q. Guillet<sup>1</sup>, M. Micica<sup>2</sup>, S. Massabeau<sup>3</sup>, D. Dosenovic<sup>4</sup>, L. Vojacek<sup>1</sup>, F. Ibrahim<sup>1</sup>, C. Vergnaud<sup>1</sup>, A. Marty<sup>1</sup>, I. Gomes De Moraes<sup>1</sup>, F. Bonell<sup>1</sup>, J.Y. Veuillen<sup>5</sup>, P. Mallet<sup>5</sup>, D. Jalabert<sup>4</sup>, H. Okuno<sup>4</sup>, J.M. George<sup>3</sup>, H. Jaffrès<sup>3</sup>, M. Chshiev<sup>1</sup>, S. Dhillon<sup>2</sup>**  
<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS, G-INP, IRIG-SPINTEC, Grenoble (FR)  
<sup>2</sup> LPS-ENS, Univ. PSL, CNRS, Sorbonne Univ., Univ. Paris (FR)  
<sup>3</sup> Laboratoire Albert Fert, CNRS, Thalès, Univ. Paris-Saclay, Palaiseau (FR)  
<sup>4</sup> Univ. Grenoble Alpes, CEA, IRIG-MEM, Grenoble (FR)  
<sup>5</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, Institut Néel, Grenoble (FR)
- 09:40 **#22** - Contribution des IBA à l'étude des performances chimiques et mécaniques de couches minces d'oxycarbonitride de silicium pour le stockage de médicament  
**B. Diallo<sup>1</sup>, F. Inoubli<sup>1</sup>, K.C. Topka<sup>2</sup>, R. Laloo<sup>3</sup>, B. Caussat<sup>4</sup>, V. Turq<sup>3</sup>, T. Sauvage<sup>1</sup>, N. Pellerin<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> CEMHTI-CNRS, Univ. Orléans (FR)  
<sup>2</sup> Air Liquide Laboratories, Innovation, Tokyo Yokosuka (JP)  
<sup>3</sup> CIRIMAT UPS, Toulouse (FR)  
<sup>4</sup> LGC, Toulouse (FR)
- 10:00 **#07** - Etude des interfaces solide/gaz par la technique NRA in-situ : application aux matériaux getters  
**T. Sauvage<sup>1</sup>, C. Kutyla<sup>2</sup>, C. Bessouet<sup>2</sup>, S. Lemettre<sup>2</sup>, A. Bosseboeuf<sup>2</sup>, J. Moulin<sup>2</sup>, B. Diallo<sup>1</sup>, A. Bellamy<sup>1</sup>, O. Wendling<sup>1</sup>, P. Sigot<sup>1</sup>, W. Hate<sup>1</sup>, O. Thomas<sup>3</sup>, S. Escoubas<sup>3</sup>, C. Guichet<sup>3</sup>**  
<sup>1</sup> CNRS CEMHTI UPR 3079, Univ. Orléans (FR)  
<sup>2</sup> C2N, CNRS UMR 9001, Palaiseau (FR)  
<sup>3</sup> IM2NP, CNRS, Marseille Univ., Univ. Toulon, Marseille (FR)
- 10:20 **Pause (30')**

## MERCREDI 2 OCTOBRE 2024

Chair : J. Colaux

- 10:50 **#23** - Analyse par faisceaux d'ions des matériaux getter à base d'Yttrium  
**H. Nabil**<sup>1</sup>, **T. Sauvage**<sup>2</sup>, **C. Bessouet**<sup>3</sup>, **C. Kutyla**<sup>1</sup>, **A. Bosseboeuf**<sup>1</sup>, **S. Lemaitre**<sup>1</sup>,  
**A. Bellamy**<sup>4</sup>, **O. Wendling**<sup>4</sup>, **J. Moulin**<sup>4</sup>  
<sup>1</sup> C2N, Paris (FR)  
<sup>2</sup> CEMHTI, Orléans (FR)  
<sup>3</sup> CEMHTI, Paris (FR)  
<sup>4</sup> CNRS, Orléans (FR)
- 11:10 **#11** - Profilage de l'hydrogène par RNRA : incertitudes et limites de détection  
**P-L. Debarsy**<sup>1,2</sup>, **J. Colaux**<sup>2</sup>, **A. Duvernois**<sup>3</sup>, **M. Bommer**<sup>4</sup>  
<sup>1</sup> SIAM, UNamur, Namur (BE)  
<sup>2</sup> LARN, Namur Institute of Structured Matter (NISM), UNamur, Namur (BE)  
<sup>3</sup> Grenoble INP, Grenoble (FR)  
<sup>4</sup> CPE Lyon, Lyon (FR)
- 11:30 **#05** - Caractérisation de scintillateurs à partir de protons de 3MeV issus de la plateforme AIFIRA  
**A. Huber**<sup>1</sup>, **F. Hannachi**<sup>1</sup>, **M. Huault**<sup>2</sup>, **J. Jouve**<sup>1</sup>, **A. Maitrallain**<sup>1</sup>, **P. Nicolai**<sup>2</sup>,  
**D. Raffestin**<sup>2</sup>, **S. Sorieul**<sup>1</sup>, **M. Tarsien**<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> LP2IB, Gradignan (FR)  
<sup>2</sup> CELIA, Talence (FR)
- 11:50 **#16** - Le retour vers le futur des analyses IBA sur la plateforme JANNuS Saclay : des premières mesures originales  
**B. Ridard**, **G. Gutierrez**, **C. Bernard**, **P. Billaud**, **D. Bossu**, **H. Martin**, **F. Nozais**,  
**G. Sagnes**  
Jannus Saclay, SRMP, Univ. Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette (FR)
- 12:10 *Déjeuner*

## MERCREDI 2 OCTOBRE 2024

Chair : F. Garrido

- 14:00 **INV-3 - Les défauts d'irradiation paramagnétiques des argiles : nature, stabilité et applications en sciences de la Terre**  
*Conférence Invitée*  
**T. Allard, M. Mathian, O. Ataytür, E. Balan**  
*IMPMC-UPMC, Sorbonne Univ. (FR)*
- 14:40 **#14 - Recherche sur la qualité de l'air en utilisant des filtres passifs tel que des feuilles, mousse et tronc d'arbre grâce à l'analyse par faisceau d'ions**  
**P. Couture<sup>1</sup>, D. Wu<sup>2</sup>, R. Webb<sup>1</sup>, V. Palitsin<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> *Surrey Ion Beam Centre, Univ. Surrey (UK)*  
<sup>2</sup> *Comp Sci & Elec Eng, Univ. Surrey (UK)*
- 15:00 **#15 - Développement d'un système d'analyse microsonde IBA au LARN (UNAMUR) : Application à l'étude de colorations exceptionnelles dans les spéléothèmes**  
**L. Baseil<sup>1</sup>, T. Tabarrant<sup>1</sup>, M. Vlieghe<sup>2</sup>, J. Yans<sup>2</sup>, J.L. Colaux<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> *LARN, Namur Institute of Structured Matter (NISM), UNamur, Namur (BE)*  
<sup>2</sup> *Institute of Life, Earth and Environment (ILEE), Univ. Namur (BE)*
- 15:20 *Pause (40')*
- 16:00 **Atelier 1 : Gestion et archivage des données (FAIR data)**  
*animé par C. Pacheco (New AGLAE)*
- 17:00 **Atelier 2 : Réseau RASTA (Réseau d'Aides Scientifiques et Techniques des Accélérateurs)**  
*animé par E. Briand (INSP Jussieu)*
- 18:00 **Session poster**
- 19:30 *Dîner*

## JEUDI 3 OCTOBRE 2024

### Chair : C. Pacheco

- 09:00 **INV-4 - AGLAÉ, un outil d'excellence pour identifier l'origine et les processus de production des vitraux français**  
**Conférence Invitée**  
**C. Loisel**  
*LRMH, MNHN, Sorbonne Univ. (FR)*
- 09:40 **#20 - L'intelligence artificielle au service du traitement de l'imagerie 3D Total-IBA : application aux vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris**  
**A. Tazzioli<sup>1,2</sup>, Q. Lemasson<sup>2</sup>, A. Girard<sup>3</sup>, C. Loisel<sup>4</sup>, L. Pichon<sup>2</sup>, B. Moignard<sup>2</sup>, C. Pacheco<sup>2</sup>**  
<sup>1</sup> *Institut de Recherche de Chimie Paris (FR)*  
<sup>2</sup> *Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Paris (FR)*  
<sup>3</sup> *Edf R&D, Chatou (FR)*  
<sup>4</sup> *LRMH, Centre de Recherche sur la Conservation, Champs-sur-Marne (FR)*
- 10:00 **#09 – S'entraîner à la crise !**  
**M. Courselaud**  
*C2RMF/DCP, Paris (FR)*
- 10:20 **Pause (30')**

### Chair : P. Barberet

- 10:50 **INV-5 - Champs électriques dans l'eau liquide irradiée par des protons de 3 MeV à des débits de dose très élevés**  
**Conférence Invitée**  
**F. Gobet**  
*LP2IB, Univ. Bordeaux (FR)*
- 11:30 **#06 – Etude in situ de la fragmentation radio-induite de l'ADN en solution aqueuse**  
**R. Lienard<sup>1</sup>, F. Gobet<sup>1</sup>, P. Barberet<sup>1</sup>, G. Devès<sup>1</sup>, T. Guérin<sup>2</sup>, L. Plawisky<sup>1</sup>, C. Michelet<sup>1</sup>, H. Seznec<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> *Laboratoire de Physique des Deux Infinis de Bordeaux (LP2I), Gradignan (FR)*  
<sup>2</sup> *Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (LOMA), Talence (FR)*
- 11:50 **#13 – Etude in situ par spectroscopie Raman de l'altération de biosignatures sous irradiation : aide à la recherche de vie sur Mars**  
**F. Foucher<sup>1</sup>, M. Baqué<sup>2</sup>, J.P.P. De Vera<sup>3</sup>, A. Canizarès<sup>1</sup>, R. Martellotti<sup>4</sup>, T. Sauvage<sup>1</sup>, O. Wendling<sup>1</sup>, P. Sigot<sup>1</sup>, A. Bellamy<sup>1</sup>, W. Hate<sup>1</sup>, F. Westall<sup>5</sup>**  
<sup>1</sup> *CNRS, CEMHTI, Orléans (FR)*  
<sup>2</sup> *German Aerospace Center (DLR), Institute of Planetary Research, Berlin (DE)*  
<sup>3</sup> *German Aerospace Center (DLR), Space Operations & Astronaut Training, Musc, Cologne (DE)*  
<sup>4</sup> *Univ. Trieste (IT)*  
<sup>5</sup> *CNRS, CBM, Orléans (FR)*
- 12:10 **#02 – Conception et optimisation d'une Faraday cup dédiée à la dosimétrie de faisceaux de protons UHDR**  
**L. Schoenauen<sup>1</sup>, R. Coos<sup>1</sup>, J. Colaux<sup>2</sup>, A.C. Heuskin<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup> *Namur Research Institute for Life Sciences (NARILIS), Univ. Namur (BE)*  
<sup>2</sup> *Namur Institute of Structured Matter (NISM), Univ. Namur (BE)*
- 12:30 **Déjeuner**

## JEUDI 3 OCTOBRE 2024

- 14:15      **Programme social**
- 15:00      Excursion en bateau : Tour de l'Île aux Oiseaux
- 17:30      Dégustation d'huîtres chez Boulan
- 19:30      Dîner de convivialité au Pinasse Café
- 22:30      Retour au VVF

## VENDREDI 4 OCTOBRE 2024

08:45 Transfert vers le LP2i Bordeaux

10:15 *Café d'accueil*

**Chair : P. Barberet**

10:30 **INV-6 – Une histoire de l'analyse par faisceau d'ions rapides**  
**Conférence Invitée**  
**I. Vickridge**  
*INSP, Sorbonne Univ., Paris (FR)*

11:30 Visite LP2i

12:30 *Déjeuner (pique-nique)*

14:00 Transfert vers la gare SNCF Bordeaux (30')

***Merci à nos exposants partenaires :***



## PROGRAMME POSTERS

### MERCREDI 2 OCTOBRE 2024

#### 1. Instruments et techniques de faisceaux d'ions

#12 – MOSAIC, une offre complète de faisceaux d'ions pour la modification, la synthèse et l'analyse de la matière

**C. Bachelet, I. Ribaud, A. Gentils**

*Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLAB, Orsay (FR)*

#24 – Detection of Lithium traces: study on calibration standards by ion beam analysis

**V. Thoréton, D. Truffier-Boutry, F. Pierre, J.P. Barnes**

*CEA LETI - Grenoble (France)*

#### 3. Faisceaux d'ions pour l'analyse et la modification de matériaux

#17 – From crystallization to amorphization: training project on irradiation and characterization of model material for students or young researchers

**S. Pellegrino**

*CEA-INSTN-UES-LRS, Gif sur Yvette (FR)*

#### 6. Faisceaux d'ions pour les sciences du patrimoine

#03 – IBIL : une alternative pour le sourcing d'obsidienne en Méditerranée occidentale

**S. Sorieul<sup>1</sup>, J. Jouve<sup>1</sup>, S. Dubernet<sup>2</sup>, F.X. Le Bourdonnec<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> LP2IB, UMR 5797, Université de Bordeaux, CNRS, Gradignan, (FR)

<sup>2</sup> Archéosciences Bordeaux, Université de Bordeaux, EPHE-PSL, Pessac (FR)

#18 – De la plante à l'accélérateur, en passant par la toile de Pierre Soulages : le parcours d'une fibre de lin, des champs au laboratoire

**L. Beck<sup>1</sup>, I. Caffy<sup>1</sup>, P. Hélou-De La Grandière<sup>2</sup>, C. Coustet<sup>3</sup>, M. Thoury<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire de Mesure du Carbone 14, Gif-sur-Yvette (FR)

<sup>2</sup> Atelier La Grandière, Nîmes (FR)

<sup>3</sup> CNRS/IPANEMA, St Aubin (FR)

#28 – Développement de réseaux neuronaux artificiels pour le traitement de spectres RBS d'objets patrimoniaux à New AGLAE

**A. Tazzioli<sup>1</sup>, S. Jaoui<sup>2</sup>, Q. Lemasson<sup>3</sup>, A. Girard<sup>4</sup>, J.P. Berthet<sup>5</sup>, L. Pichon<sup>3</sup>, C. Pacheco<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> C2RMF - Paris (France)

<sup>2</sup> Sorbonne Univ. - Paris (FR)

<sup>3</sup> UAR3506 CNRS / Ministère de la Culture / ENSCP-Université PSL, C2RMF - Paris (FR)

<sup>4</sup> EDF R&D – Chatou (FR)

<sup>5</sup> UAR3506 CNRS / Ministère de la Culture / ENSCP-Université PSL - Paris (FR)

# **SESSIONS CONFÉRENCES**

*Conférence invitée*

## **DÉGÂTS D'IRRADIATION ET MATÉRIAUX POUR LA FUSION : OPPORTUNITÉS ET DÉFIS**

**R.E. Schäublin**

*Laboratory of Metal Physics and Technology, Department of Materials, ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland*

L'irradiation aux ions est un outil qui permet d'explorer et de modifier les matériaux, mais aussi de tester ceux qui sont soumis à des conditions extrêmes d'irradiation. Un des domaines de prédilection pour cette application est le futur réacteur à fusion thermonucléaire. L'énergie de fusion représente une voie prometteuse pour la production d'énergie durable et sans carbone, mais sa réalisation dépend de notre capacité à surmonter d'importants défis en matière de matériaux. Cet exposé explorera le rôle critique que jouent les matériaux pour permettre aux réacteurs de fusion de résister aux conditions extrêmes auxquelles ils sont confrontés, avec un flux de neutrons élevé, une large charge thermique et une exposition prolongée au plasma (incorporation de l'hélium). Les matériaux candidats les plus prometteurs sont, entre autres, les aciers ferritiques à base Fe-Cr et le tungstène. Leur dégradation commence par les dommages causés par l'irradiation aux neutrons de fusion à 14 MeV. La conséquence la plus directe est le durcissement du matériau, et concomitamment sa fragilisation, incompatible avec la sûreté du réacteur. Une bonne compréhension de ces mécanismes est nécessaire pour en mitiger les conséquences, en commençant par une description détaillée de la microstructure induite par irradiation.

Les récentes avancées technologiques dans l'analyse corrélée des matériaux par microscopie électronique ou par sonde atomique tomographique nous permettent d'atteindre maintenant des informations au niveau atomique sans précédents. Aussi, le développement rapide des outils numériques soutenus par l'intelligence artificielle permet d'extraire ces informations et ses tendances de manière plus systématique et, plus avant, d'éventuellement anticiper la microstructure et le comportement mécanique des matériaux selon les conditions d'irradiation. Idéalement, cette approche pourrait nous permettre de définir des matériaux qui présentent une résistance adéquate à l'irradiation. Nous mettrons également l'accent sur les dernières avancées dans le domaine de la science des matériaux, telles que les alliages à haute entropie et les matériaux nanostructurés, qui offrent de nouvelles possibilités pour faire progresser la technologie de la fusion. En examinant à la fois les obstacles actuels et les perspectives d'avenir, cette présentation soulignera à quel point une bonne compréhension des mécanismes fondamentaux d'endommagement par irradiation et des solutions innovantes en matière de matériaux sont cruciales pour faire de l'énergie de fusion une solution viable et évolutive pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux. Finalement, un regard sera porté sur quelques applications originales des études de l'impact de l'irradiation sur des alliages métalliques.

#IBAF00019

## INFLUENCE DU FLUX DE PARTICULES SUR LA NATURE DES BOUCLES DE DISLOCATION FORMEES DANS LE NICKEL

L. Lefort<sup>1,2\*</sup>, M. Loyer-Prost<sup>2</sup>, T. Jourdan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay (France)

<sup>2</sup> CEA, Service de Recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, SRMP - Gif Sur Yvette (France)

\* [lisa.lefort@cea.fr](mailto:lisa.lefort@cea.fr)

Le nickel est utilisé comme matériau modèle pour les alliages cubiques à faces centrées (FCC) afin d'obtenir un aperçu des mécanismes fondamentaux des dommages causés par les irradiations. Dans une étude précédente, de grandes boucles de Frank lacunaires ont été trouvées dans des lames minces de Ni irradiées à haute température [1]. La formation de ces boucles de Frank lacunaires a été expliquée en supposant un biais de production d'au moins ~ 10% d'interstitiels dû à une migration unidimensionnelle de clusters interstitiels créés au sein des cascades de déplacement. Les équations du modèle théorique des biais des dislocations suggèrent que le flux ionique pourrait influencer la formation de ces boucles.

Dans ce travail, nous avons étudié expérimentalement l'influence du flux sur la nature des boucles de dislocation créées dans le nickel irradié par des ions lourds sous la forme de lame mince. Pour ce faire, différentes expériences sont réalisées dans les installations JANNuS, avec une variation d'un facteur 100 sur le flux. La nature des boucles de Frank mais aussi celle des boucles parfaites sont analysée grâce au développement d'une nouvelle méthodologie basée sur la stéréomicroscopie. Les résultats sont discutés au regard des modèles théoriques.

### Références

[1] Kan Ma, Brigitte Décamps, Anna Fraczkiewicz, Thomas Jourdan, Frédéric Prima, Marie Loyer-Prost. Free surface impact on radiation damage in pure nickel by in-situ self-ion irradiation: can it be avoided? Acta Materialia, Volume 212, 2021, 116874, ISSN 1359-6454, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116874>

#IBAF00021

## CROISSANCE D'UN FILM ALD D' $\text{Al}_2\text{O}_3$ ÉTUDIÉE PAR ANALYSE DU FAISCEAU D'IONS (IBA) ET SPECTROSCOPIE PHOTOÉLECTRONIQUE À RAYONS X : VERS LA COMPRÉHENSION DE L'INFLUENCE DES IMPURETÉS SUR LA STRUCTURE ÉLECTRONIQUE

B. Xia<sup>1,\*</sup>, J.J. Ganem<sup>1</sup>, E. Briand<sup>1</sup>, S. Steydli<sup>1</sup>, A. Wanda Baron-Wiechec<sup>2</sup>, I. Vickridge<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université - Paris (France)

<sup>2</sup> Guangdong Technion-Israel Institute of Technology - Paris (France)

\* [bingbing.xia@insp.jussieu.fr](mailto:bingbing.xia@insp.jussieu.fr)

Les films minces d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  obtenus par dépôt de couches atomiques (ALD) ont suscité beaucoup d'intérêt en raison de leurs applications dans les dispositifs électroniques et les matériaux énergétiques. Dans cette étude, nous étudions systématiquement le mécanisme de croissance des films minces d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  sur des substrats de Si (100) par ALD, avec du triméthylaluminium (TMA) comme précurseur métallique et de la vapeur  $\text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{D}_2\text{O}$  comme oxydant.

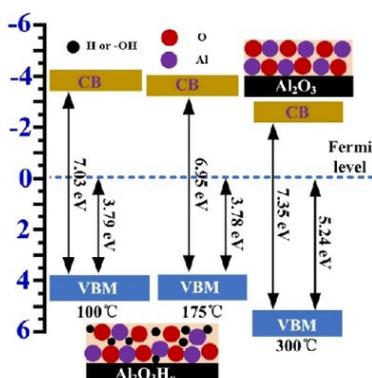
Nous analysons la composition du film en fonction de la température de dépôt en utilisant l'analyse du faisceau d'ions (IBA) avec l'analyse de la réaction nucléaire (NRA) pour déterminer la teneur en Al, C et O, tandis que l'analyse par recul élastique (ERDA) donne des indications sur la distribution de l'hydrogène en profondeur. L'utilisation de  $\text{D}_2\text{O}$  au cours du processus ALD permet de distinguer l'origine des atomes d'hydrogène du précurseur TMA de ceux de la vapeur d'eau.

Pour évaluer l'état d'oxydation de la surface, la spectroscopie de photoélectrons (XPS) est utilisée. Nous étudions la structure de bande du film en fonction de la température de dépôt à l'aide de la spectroscopie de photoélectrons dans l'ultraviolet (UPS) et de la spectroscopie de perte d'énergie des électrons (EELS).

Notre recherche se concentre sur la compréhension des relations entre le mécanisme de croissance du film, la composition, la distribution des impuretés et la température de dépôt. Pour la première fois, nous fournissons des preuves expérimentales reliant ces paramètres à la structure des bandes. Ces résultats ont le potentiel de redéfinir les applications des films d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  dans les dispositifs électroniques et peuvent inspirer de nouvelles approches pour adapter les propriétés des films d'alumine par ALD.

### Références

- Xia, B.; Ganem, J.-J.; Vickridge, I.; Briand, E.; Steydli, S.; Benbalagh, R.; Rochet, F., Water-rich conditions during titania atomic layer deposition in the 100° C-300° C temperature window produce films with TiIV oxidation state but large H and O content variations. *Applied Surface Science* 2022, 601, 154233.
- Xia, B.; Ganem, J.; Briand, E.; Steydli, S.; Tancrez, H.; Vickridge, I., The carbon and hydrogen contents in ALD-grown ZnO films define a narrow ALD temperature window. *Vacuum* 2021, 190, 110289.



Bande interdite et VBM des films d' $\text{Al}_2\text{O}_3$

#IBAF00026

## UTILISATION DE DIFFÉRENTS SCÉNARIOS D'IRRADIATION AUX IONS POUR SIMULER LA DÉSINTÉGRATION ALPHA : APPLICATION AU CAS DE VITROCÉRAMIQUES DOPÉES EN <sup>241</sup>Am

S. Miro<sup>1,\*</sup>, N. Sellami<sup>1</sup>, S. Peugeot<sup>1</sup>, G. Jouan<sup>1</sup>, G. Gutierrez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA, DES, ISEC, DE2D, Université de Montpellier, Marcoule - Bagnols-sur-Cèze (France)

<sup>2</sup> CEA, DES, ISAS, DRMP, Université Paris-Saclay - Gif-sur-Yvette (France)

\* [sandrine.miro@cea.fr](mailto:sandrine.miro@cea.fr)

Dans la gestion des déchets nucléaires en France, les verres borosilicatés R7T7 sont utilisés pour confiner les produits de fission et les actinides mineurs [1]. Les matrices vitrocéramiques pourraient constituer une alternative pour l'immobilisation de quantités plus importantes de radionucléides, mais leur comportement sous auto-irradiation doit être évalué. Pour cela, une étude a été réalisée dans les cellules blindées de l'installation ATALANTE (CEA Marcoule) afin d'examiner l'évolution de vitrocéramiques alumino-borosilicatées dopées en <sup>241</sup>Am contenant des cristaux d'apatite Ca<sub>2</sub>(La,Am)<sub>8</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>O<sub>2</sub> [2]. Les changements structuraux et microstructuraux sous auto-irradiation alpha ont été suivis sur une période de 8 ans, révélant une amorphisation progressive des cristaux d'apatite. Une amorphisation complète s'est produite à une dose de désintégration alpha d'environ 3×10<sup>18</sup> α/g, accompagnée d'un gonflement macroscopique et d'une décohésion des cristaux de la matrice vitreuse. Pour comprendre les effets séparés et combinés du dépôt d'énergie nucléaire (S<sub>n</sub>) des noyaux de recul et du dépôt d'énergie électronique (S<sub>e</sub>) de la particule alpha, des expériences de multi-irradiations de céramiques frittées d'apatite ont été réalisées sur la plateforme JANNUS (CEA Saclay). Des ions Au<sup>5+</sup> de 12 MeV ont été utilisés pour simuler les noyaux de recul et des ions He<sup>+</sup> de 3 MeV, les particules alpha. Les processus nucléaires ont principalement contribué aux dommages, contrairement aux effets électroniques. En effet, les ions Au<sup>5+</sup> ont conduit à l'amorphisation des apatites avec une expansion volumique d'environ 8 %. À l'inverse, les ions He<sup>+</sup> ont entraîné qu'un léger gonflement des apatites. De plus, un effet de guérison des dommages balistiques a été observé lors de l'irradiation par des ions He<sup>+</sup> des apatites préalablement endommagées par des ions Au<sup>5+</sup>. Enfin, ces expériences ont montré que le scénario multi-séquentiel représente le mieux la cinétique d'amorphisation des cristaux d'apatite dans les vitrocéramiques dopées en <sup>241</sup>Am. Ces données sont actuellement utilisées pour développer un modèle du comportement mécanique des vitrocéramiques sous auto-irradiation.

### Références

[1] S. Gin, et al., Radiochim. Acta 105 (11) (2017) 927–959.

[2] S. Miro et al., Journal of Nuclear Materials 580 (2023) 154397.

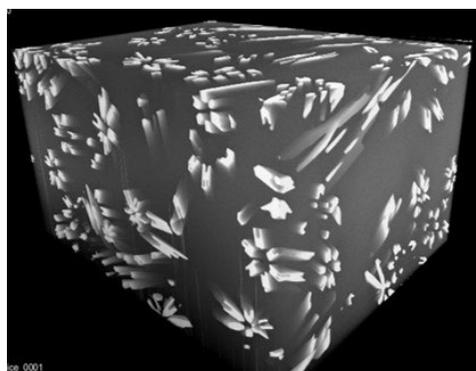


Image MEB-FIB 3D d'une vitrocéramique

#IBAF00025

## VERS UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES PHÉNOMÈNES DE CORROSION SOUS IRRADIATION

**J-B. Pruvo<sup>1,\*</sup>, B. Bernard<sup>1</sup>, S. Radchi<sup>1</sup>, F. Balbaud<sup>1</sup>, J.L. Béchade<sup>1</sup>, G. Gutierrez<sup>1</sup>, F. Nozais<sup>1</sup>, D. Bossu<sup>1</sup>, H. Martin<sup>1</sup>, C. Cabet<sup>2</sup>, M. Loyer-Prost<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, SRMP - Gif-Sur-Yvette (France)

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service de Recherches en Matériaux et Procédés Avancés - Gif-Sur-Yvette (France)

\* [jean-baptiste.pruvo@cea.fr](mailto:jean-baptiste.pruvo@cea.fr)

Les réacteurs à Sels Fondus (en anglais, Molten Salt Reactors, MSR) sont des concepts innovants avec de réels atouts pour la gestion des déchets fortement radioactifs générés par les réacteurs actuels. Néanmoins, le choix des matériaux de structure reste un défi important dans leur développement, notamment vis-à-vis de leur résistance à la corrosion sous irradiation. Les mécanismes de corrosion en milieu chlorures fondus sous irradiation sont complexes et suscitent l'intérêt de la communauté scientifique. Les cinétiques de corrosion sont en effet le plus souvent aggravées par l'irradiation [1-5] mais dans certaines conditions la possibilité d'une guérison partielle par l'irradiation est avancée [6-8].

Cette étude s'insère dans le cadre du projet France relance ISAC (Innovative System for Actinides Conversion) dont l'objectif est d'étudier la faisabilité de transmutation des actinides mineurs dans les MSR. Elle vise à explorer et comprendre les mécanismes de couplage entre la corrosion en sels fondus et l'irradiation. A cette fin, une chambre de corrosion et irradiation in-situ est en cours de développement sur la plateforme JANNuS-Saclay. Parallèlement, des études préliminaires de pré-irradiation suivies de corrosion, ou de pré-corrosion suivies d'irradiation, sont réalisées sur des alliages modèles des matériaux à base de nickel (Ni-10%at. Cr, Ni-10%at. Fe, et Ni-10% Mo). Nous détaillerons ici le développement de la chambre in-situ d'irradiation-corrosion ainsi que la méthodologie mise en place pour étudier des matériaux pré-corrodés puis irradiés. Les premiers résultats obtenus seront présentés et discutés.

### Références

- [1] DiStefano et al., ORNL/TM-12925/R1 (1995)
- [2] Bakai A. S. in Materials issues for generation IV systems: status, open questions and challenges; (2008) 537
- [3] Lei G et al, Corrosion Science (2020)
- [4] Liu M. et al, Corrosion Science (2019)
- [5] Zhu H. et al, Corrosion Science (2017)
- [6] Zhou W. et al, Nature Communications (2020)
- [7] Zhou W. et al, Nucl. Inst. Methods B (2019)
- [8] Ezell N.D.B. et al, Nuc. Eng. Technol. (2021)

#IBAF00004

## CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'OXYDATION DU TITANE ET DE SES ALLIAGES À L'AIDE DE L'ANALYSE PAR FAISCEAUX D'IONS

**L. Lavisse<sup>1,\*</sup>, B. Berger<sup>2</sup>, V. Optasanu<sup>1</sup>, M.C. Marco De Lucas<sup>1</sup>, T. Sauvage<sup>3</sup>, B. Diallot<sup>3</sup>, S. Sorieul<sup>4</sup>, J. Jouve<sup>4</sup>, T. Montesin<sup>1</sup>, J.M. Jouvard<sup>1</sup>, J.B. Mitchell<sup>5</sup>, J.L. Legarrec<sup>6</sup>, F. Herbst<sup>1</sup>, O. Heintz<sup>1</sup>, N. Geoffroy<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB), UMR 6303 CNRS-Université Bourgogne - Dijon (France)

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, NIMBE, 91191, Gif-Sur-Yvette (France)

<sup>3</sup> CEMHTI, UPR079, Université Orléans, CNRS, Orléans (France)

<sup>4</sup> LP2IB, UMR 5797, Université de Bordeaux, CNRS, Gradignan, France - Bordeaux (France)

<sup>5</sup> MERL-Consulting SAS, Rennes (France)

<sup>6</sup> Univ Rennes 1, Inst Phys Rennes, CNRS, UMR 6251, Rennes (France)

\* [luc.lavisse@u-bourgogne.fr](mailto:luc.lavisse@u-bourgogne.fr)

Le titane est un métal relativement onéreux et pourtant il est de plus en plus utilisé que ce soit en quantité ou si on considère ses nombreux usages. Ce métal, le titane, outre qu'il est relativement peu dense par rapport aux aciers ou au nickel, possède des propriétés multiples plutôt intéressantes comme une bonne résistance à la corrosion marine, à la fatigue et à l'oxydation dans l'air pour des températures inférieures à 550°C. Cela en fait une base métallique très utilisée dans l'aéronautique même si ses propriétés en frottement sont très mauvaises et en limite alors l'usage.

Aussi, le titane fait l'objet de très nombreuses études, depuis un demi-siècle, afin de mieux comprendre son comportement dans l'air notamment lorsqu'il est soumis à des expositions à Hautes Températures (HT). A la fin des années 1980, l'effet bénéfiques de l'azote dans cette tenue à l'oxydation du titane à HT a été évoquée, mais n'est que plus récemment que des investigations plus poussées ont permis de mieux comprendre pourquoi.

Celles-ci ont nécessité des techniques d'analyses complémentaires, diverses et parfois assez complexes (MEB, MET, SIMS, Raman, DRX, SDL et tomographie). Néanmoins, l'analyse par faisceau d'ions (IBA), particulièrement avec un faisceau de deutérons, permet du fait de sa spécificité et de sa sensibilité, l'identification, la localisation, la distribution et la quantification de l'azote qui s'insère au cours des expositions du titane ou de ses alliages. Mais souvent, ces analyses ne sont pas spécifiquement dédiées à l'analyse des éléments légers comme l'est l'azote. Cette spécificité d'analyse de l'azote que procure les conditions choisies font qu'il est plus facile alors de corréler les mécanismes à l'origine des effets bénéfiques dus à l'insertion de l'azote au cours des expositions à HT dans l'air.

En une vingtaine d'année, les analyses par faisceaux d'ions effectués sur divers bases métalliques, principalement sur des alliages de titane, ont permis de suivre l'insertion de l'azote au cours des expositions à HT dans l'air et pour les alliages de titane de montrer qu'une accumulation d'azote se créait juste en dessous de la couche d'oxyde, qu'elle se renouvelait en permanence au cours des expositions à HT et qu'elle suivait le déplacement de l'interface métal – oxyde et que certains éléments d'addition, comme le silicium ou le niobium par exemple, en modifiant le flux d'oxygène dans la couche d'oxyde favorisaient en fait cette accumulation et donc la résistance de l'alliage à l'oxydation.

### Conférence invitée

## CROISSANCE DE MATERIAUX 2D SUR GRANDES SURFACES PAR EPITAXIE DE VAN DER WAALS

M. Jamet<sup>1</sup>, C. Jego<sup>1</sup>, K. Abdukayumov<sup>1</sup>, Q. Guillet<sup>1</sup>, M. Micica<sup>2</sup>, S. Massabeau<sup>3</sup>, D. Dosenovic<sup>4</sup>, L. Vojacek<sup>1</sup>, F. Ibrahim<sup>1</sup>, C. Vergnaud<sup>1</sup>, A. Marty<sup>1</sup>, I. Gomes De Moraes<sup>1</sup>, F. Bonell<sup>1</sup>, J.Y. Veuillen<sup>5</sup>, P. Mallet<sup>5</sup>, D. Jalabert<sup>4</sup>, H. Okuno<sup>4</sup>, J.M. George<sup>3</sup>, H. Jaffrès<sup>3</sup>, M. Chshiev<sup>1</sup>, S. Dhillon<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble Alpes, Cea, Cnrs, G-Inp, Irig-Spintec, 38000 Grenoble, France - Grenoble (France)

<sup>2</sup> Laboratoire De Physique De L'ecole Normale Supérieure, Ens, Université Psl, Cnrs, Sorbonne Université, Université De Paris, Paris, France - Paris (France)

<sup>3</sup> Laboratoire Albert Fert, Cnrs, Thales, Université Paris-Saclay, 91767, Palaiseau, France - Palaiseau (France)

<sup>4</sup> Université Grenoble Alpes, Cea, Irig-Mem, 38000 Grenoble, France - Grenoble (France)

<sup>5</sup> Université Grenoble Alpes, Cnrs, Grenoble Inp, Institut Neel, 38000 Grenoble, France - Grenoble (France)

Les dichalcogénures de métaux de transition (TMD) sont des matériaux quantiques qui ont suscité un intérêt considérable pour la communauté des physiciens de l'état solide qui travaille sur les matériaux bidimensionnels (2D). Ils sont envisagés pour de nombreuses applications en photonique et en électronique en raison de la transition d'un gap indirect à un gap direct dans la limite de la monocouche et de la mobilité élevée des porteurs [1]. Ils présentent également un fort couplage spin-orbite et une grande variété de symétries cristallines, ce qui est prometteur pour les applications de spintronique [2]. Jusqu'à récemment, la plupart des études sur les TMD ont été réalisées sur des flocons de taille micrométrique exfoliés mécaniquement à partir du matériau massif. Des efforts considérables sont déployés pour permettre la croissance de films monocristallins de TMD à l'échelle du wafer [3]. L'absence de substrats avec un paramètre de maille adapté et la réactivité élevée des atomes de chalcogène empêchent la croissance épitaxiale de monocouches par épitaxie par jets moléculaires (MBE) sur les substrats habituels (Si, Ge, GaAs...). Dans cette présentation, je discuterai de notre stratégie pour réaliser la croissance de monocouches de TMD monocristallins par épitaxie de van der Waals (vdW). Dans ce régime, le substrat présente une surface de vdW comme le graphène, le mica ou le GaAs passivé au Se pour limiter l'interaction substrat-couche et s'affranchir de la contrainte d'accord de paramètre de maille. Dans une deuxième partie, je présenterai l'épitaxie vdW de PtSe<sub>2</sub> à fort couplage spin-orbite sur graphène pour l'émission THz par conversion de spin en charge [4]. Enfin, je démontrerai les avantages de l'épitaxie de vdW pour produire des ferromagnétiques 2D bien contrôlés : Fe<sub>5</sub>GeTe<sub>2</sub> avec une température de Curie élevée proche de la température ambiante [5] et Cr<sub>1+x</sub>Te<sub>2</sub> avec des propriétés magnétiques accordables par déformation et en ajustant la stœchiométrie [6]. Pour tous ces matériaux, l'utilisation de l'analyse chimique par faisceau d'ions (RBS) est indispensable pour relier précisément la composition aux propriétés physiques.

### Références

[1] A. K. Geim and K. S. Novoselov, Nat. Mater. 6, 183 (2007).

[2] H. Yang et al., Nature 606, 663 (2022).

[3] M. T. Dau et al., ACS Nano 12, 2319 (2018).

[4] K. Abdukayumov et al., Adv. Mater. 2024, 36, 2304243.

[5] M. Ribeiro et al., npj 2D Mater. & Appl. 6, 10 (2022).

[6] Q. Guillet et al. Phys. Rev. Mater. 7, 054005 (2023).

#IBAF00022

## CONTRIBUTION DES IBA À L'ÉTUDE DES PERFORMANCES CHIMIQUES ET MÉCANIQUES DE COUCHES MINCES D'OXYCARBONITRURE DE SILICIUM POUR LE STOCKAGE DE MÉDICAMENT

**B. Diallo<sup>1,\*</sup>, F. Inoubli<sup>1,\*</sup>, K.C. Topka<sup>2</sup>, R. Laloo<sup>3</sup>, B. Caussat<sup>4</sup>, V. Turq<sup>3</sup>, T. Sauvage<sup>1</sup>, N. Pellerin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Université d'Orléans CEMHTI-CNRS - Orléans (France)

<sup>2</sup> Air Liquide Laboratories, Innovation - Tokyo Yokosuka (Japon)

<sup>3</sup> CIRIMAT UPS - Toulouse (France)

<sup>4</sup> LGC - Toulouse (France)

\* [babacar.diallo@cnrs-orleans.fr](mailto:babacar.diallo@cnrs-orleans.fr)

[farah.inoubli@cnrs-orleans.fr](mailto:farah.inoubli@cnrs-orleans.fr)

Cette étude explore les performances chimiques et mécaniques des couches minces d'oxycarbonitruure de silicium déposées par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) à pression atmosphérique, fonctionnant à basse température (550°C-650°C), lorsqu'elles sont exposées à des solutions aqueuses dans des conditions extrêmes de pH et de température. Nous avons utilisé diverses techniques d'analyse par faisceau d'ions, telles que l'ERDA pour quantifier la concentration d'hydrogène, la NRA pour la quantification de l'oxygène, de l'azote et du carbone, et la RBS pour quantifier le silicium. Les expériences réalisées ont permis d'interpréter le comportement des films avec l'estimation de leur densité volumique grâce à la quantification de la densité surfacique des différents atomes obtenue à partir de la simulation des spectres avec SIMNRA. Nous avons également mesuré les pertes d'épaisseur par dissolution à l'aide de la RBS pour élucider les mécanismes de dégradation et en déduire la durabilité de chaque échantillon, en corrélant ces résultats avec la composition et structure initiale des films.

Nos résultats révèlent que les mécanismes de dégradation consistent soit en une oxydation des films, soit en une attaque préférentielle des groupes  $\text{SiO}_4$  et  $\text{SiO}_x\text{N}_y$ , conduisant à une perte significative d'oxygène, selon les caractéristiques initiales du film. Nous avons établi des corrélations directes entre les taux de substitution de l'oxygène par l'azote et le carbone et l'amélioration de la résistance chimique et mécanique des films. Plus précisément, les films contenant une plus grande quantité d'azote et de carbone montrent une plus grande résistance à l'altération.

Une découverte notable est le rôle du carbone dans la réduction du taux d'oxydation des films, améliorant ainsi leur durabilité. Les données IBA ont également permis de fournir des explications cohérentes sur les variations complexes de la dureté et de l'élasticité observées après altération, mesurées par nanoindentation. Les films à haute teneur en azote et en carbone présentent une réduction moindre de la dureté et conservent de meilleures propriétés d'élasticité après exposition à des conditions extrêmes.

Cette approche globale non seulement améliore notre compréhension de la durabilité des films d'oxycarbonitruure de silicium, mais souligne également l'influence significative des attributs de composition et de structure initiaux sur leurs performances dans des conditions extrêmes. En classant les films testés en différentes catégories en fonction de leurs comportements face à l'altération, nous avons une vision plus précise des facteurs contribuant à la robustesse de ces matériaux.

#IBAF00007

## ETUDE DES INTERFACES SOLIDE/GAZ PAR LA TECHNIQUE NRA IN-SITU : APPLICATION AUX MATÉRIAUX GETTERS

T. Sauvage<sup>1,\*</sup>, C. Kutyla<sup>2</sup>, C. Bessouet<sup>2</sup>, S. Lemettré<sup>2</sup>, A. Bosseboeuf<sup>2</sup>, J. Moulin<sup>2</sup>, B. Diallo<sup>1</sup>,  
A. Bellamy<sup>1</sup>, O. Wendling<sup>1</sup>, P. Sigot<sup>1</sup>, W. Hate<sup>1</sup>, O. Thomas<sup>3</sup>, S. Escoubas<sup>3</sup>, C. Guichet<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CNRS CEMHTI UPR 3079, Université d'Orléans - 45071 Orléans (France)

<sup>2</sup> C2N, CNRS UMR 9001 - 91120 Palaiseau (France)

<sup>3</sup> IM2NP, CNRS, Marseille Université, Université de Toulon - 13013 Marseille (France)

\* [thierry.sauvage@cnrs-orleans.fr](mailto:thierry.sauvage@cnrs-orleans.fr)

Les techniques IBA in-situ sont des outils performants pour l'étude de la migration/diffusion d'impuretés introduites par implantation ou de l'interdiffusion élémentaire de films multicouches lors d'un traitement thermique, mais restent une voie d'investigation émergente pour l'étude in-situ d'interfaces gaz-solide. L'IBA in-situ offre un fort potentiel de développements méthodologiques avec la mise en œuvre de marqueurs isotopiques pour étudier les mécanismes d'échange d'espèces à l'interface solide/gaz.

Nos recherches portent sur l'étude des mécanismes de sorption, de diffusion et de désorption des espèces atomiques lors d'une exposition à une atmosphère en température d'une nouvelle famille de films getters composés d'alliages à base d'yttrium. Les getters sont utilisés pour le packaging de systèmes microélectromécaniques (MEMS) en raison de leur grande capacité de sorption d'espèces gazeuses, avec pour objectif de préserver un vide moyen ( $<10^{-1}$  mbar) dans la cavité MEMS et de garantir des performances optimales du MEMS pendant 10 ans. Les films getters modernes doivent présenter une faible température d'activation et une capacité de sorption élevée sur une large diversité de gaz (oxygène, hydrogène et hydrocarbures). L'yttrium peut devenir un élément référence pour les getters, en raison de sa grande limite de solubilité en hydrogène et sa capacité à former un hydrure stable.

La mise en œuvre des IBA en mode in-situ permet l'étude de la réactivité de surface du getter pendant le cycle thermique d'activation, sans biais d'interprétation due à son exposition à l'air entre deux cycles thermiques. Des films minces  $Y_xTi_{1-x}$  sont co-évacués sous ultravide sur wafers Si. La dynamique de sorption/désorption de O et H par le getter est mesurée par NRA in-situ. Les spectres NRA sont acquis pendant le cycle thermique (jusqu'à 500 °C avec 5 °C/min) sous atmosphère O<sub>2</sub> ou D<sub>2</sub> (plage  $10^{-6}$  à  $2 \cdot 10^{-4}$  mbar). L'isotope D est utilisé comme traceur de H. Les réactions nucléaires pour mesurer les cinétiques de sorption de O et D par le getter sont  $^{16}O(d,a)^{14}N$  et  $^2H(d,p)^3H$ . Pour réaliser ces expériences, la chambre d'analyse ultravide ( $2 \cdot 10^{-8}$  mbar) est équipée d'un circuit de gaz, d'un analyseur de gaz, d'un four, d'un pyromètre et d'un détecteur PIPS. Le temps d'acquisition d'un spectre NRA est de 30 secondes, c'est-à-dire un enregistrement tous les 2,5 °C.

Cette présentation est une revue des aspects méthodologiques de la technique NRA in-situ pour l'étude de nouveaux matériaux getters et plus généralement une démonstration du fort potentiel de cette technique in-situ pour l'étude des interfaces solide/gaz.

#IBAF00023

## ANALYSE PAR FAISCEAUX D'IONS DES MATÉRIAUX GETTER À BASE D'YTTRIUM

H. Nabil<sup>1,\*</sup>, T. Sauvage<sup>2</sup>, C. Bessouet<sup>3</sup>, C. Kutyla<sup>1</sup>, A. Bosseboeuf<sup>1</sup>, S. Lemaitre<sup>1</sup>, A. Bellamy<sup>4</sup>,  
O. Wendling<sup>4</sup>, J. Moulin<sup>4</sup>

<sup>1</sup> C2N - Paris (France)

<sup>2</sup> CEMHTI - Orléans (France)

<sup>3</sup> CEMHTI - Paris (France)

<sup>4</sup> CNRS - Orléans (France)

\* [hafsa.nabil@universite-paris-saclay.fr](mailto:hafsa.nabil@universite-paris-saclay.fr)

Les getters sont des matériaux capables de sorber les molécules de gaz. Ils sont principalement utilisés dans les grands instruments pour maintenir un vide extrême ( $P < 10^{-10}$  mbar), mais aussi dans le domaine des microsystèmes électromécaniques (MEMS). En effet, certains dispositifs ont besoin d'être conservés sous vide pour un fonctionnement optimal, pendant toute leur durée de vie (20 ans). Pour y parvenir, des matériaux getter sont insérés en films minces dans la microcavité afin de compenser les fuites et le dégazage ayant lieu pendant le scellement [1]. Pour acquérir leur capacité de sorption, les films getter doivent être chauffés à une température supérieure à leur température d'activation, ce qui conduit à une diffusion en profondeur de l'oxygène présent dans la couche de passivation. Les atomes métalliques ainsi présents en surface seront capables de sorber toute nouvelle molécule de gaz se présentant, et ainsi d'entretenir le vide. Dans cette application, la sorption de tous les gaz est primordiale. Les développements actuels concernent en particulier la sorption irréversible d'hydrogène et d'hydrocarbures.

Les travaux précédents ont montré que l'yttrium était un très bon matériau getter, capable de sorber massivement les molécules d'oxygène [2] et de sorber irréversiblement l'hydrogène [3], mais l'yttrium étant hautement réactif, il est instable en conditions ambiantes sans un stockage particulier [2].

Dans ce travail, des films minces de 200 nm environ de d'Yttrium ont été déposés par Co évaporation sous l'ultra-vide ( $P < 10^{-9}$  mbar) et recouverts d'une surcouche de palladium ( $> 10$  nm) pour les protéger d'une suroxydation à l'air libre. Ces films ont été caractérisés par DRX (Diffraction Rayons X) pour déterminer leur structure cristalline, MEB (Microscope Electronique à Balayage) pour déterminer leur morphologie, IBA (Analyse par Faisceaux d'Ions) pour étudier leur composition chimique et ceci avant et après exposition en température sous gaz deutérium (D<sub>2</sub>). En d'autres termes, ce panel de techniques permet de faire un focus sur la capacité du matériau getter synthétisé à sorber en profondeur des espèces gazeuses et à former des phases cristallines pour un stockage irréversible des atomes sorbées.

### Références

[1] Bosseboeuf et al, "Effect of Environment on Activation and Sorption of Getter Alloys and Multilayers for Hybrid Wafer-level Vacuum Packaging", Sensors and Materials, Volume 31, No 9 (2019).

[2] C. Bessouet, Thèse, Université Paris-Saclay, 2021. [3] C. Kutyla, Thèse, Université Paris-Saclay, 2023.

#IBAF00011

## PROFILAGE DE L'HYDROGÈNE PAR RNRA : INCERTITUDES ET LIMITES DE DÉTECTION

**P-L. Debarsy<sup>1,\*</sup>, J. Colaux<sup>2</sup>, A. Duvernois<sup>3</sup>, M. Bommer<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> SIAM-Université de Namur - Namur (Belgique)

<sup>2</sup> Université de Namur - Namur (Belgique)

<sup>3</sup> Grenoble INP - Grenoble (France)

<sup>4</sup> CPE Lyon - Lyon (France)

\* [paul-louis.debarsy@unamur.be](mailto:paul-louis.debarsy@unamur.be)

L'hydrogène a toujours fasciné la communauté des sciences des matériaux. Il joue notamment un rôle important dans les semi-conducteurs en tant qu'agent de passivation (Lavrov et al., 2009), et son stockage suscite un intérêt croissant dans le domaine de l'énergie (Komander Kristina et al., 2024). La capacité à profiler l'hydrogène en profondeur est essentielle pour comprendre les processus de diffusion et d'accumulation de cet élément au sein des matériaux.

Au LARN, le profilage de l'hydrogène est effectué grâce à la réaction résonnante en cinématique inverse  $1\text{H}(15\text{N},\alpha\gamma)12\text{C}$ , reconnue pour ses propriétés de profilage (Wilde & Fukutani, 2014). Pour accroître la sensibilité de cette technique, les mesures sont réalisées dans un environnement bas-bruit (Debarsy et al., 2023) et un détecteur NaI(Tl) puits offrant un angle solide proche de  $4\pi$  stéradians. Pour garantir des résultats fiables, il est crucial de connaître les incertitudes et les limites de détection du système de caractérisation. Une étude ANOVA (Van Der Veen et al., 2000) a été réalisée pour évaluer les incertitudes non systématiques du système. Cette étude repose sur la répétition de la caractérisation d'un même échantillon de TiH<sub>2</sub> : cinq profils sont mesurés par expérience, l'expérience étant répétée sur six jours distincts. Les trois premières expériences ont été effectuées avec un système d'acquisition analogique, les trois suivantes avec un système numérique (CAEN). Cette approche permet d'évaluer la dispersion intra-groupe (au sein d'une même expérience) et inter-groupe (entre plusieurs expériences). Les résultats montrent une très bonne répétabilité intra-groupe, mais soulignent une variabilité inter-groupe directement liée à la définition de la région d'intérêt pour le comptage des rayons gamma issus de la réaction nucléaire.

La limite de détection a été évaluée pour des matrices de silicium et d'acier inoxydable. Cette évaluation repose sur un programme développé pour déterminer la concentration atomique d'hydrogène d'un échantillon homogène par comparaison à un étalon. La méthodologie ANOVA et le programme d'évaluation de la concentration d'hydrogène seront présentés et discutés en détail. Diverses applications potentielles de cette technique de caractérisation RNRA seront également abordées.

### Références

E. V. Lavrov et al., Phys Rev Lett 102 (2009). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.185502>.

K. Komander et al., Int J Hydrogen Energy 57 (2024) 583–588.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.032>.

M. Wilde et al., Surf Sci Rep 69 (2014) 196–295. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2014.08.002>.

P.L. Debarsy et al., AIP Adv 13 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0178215>.

A.M.H. Van Der Veen et al., Uncertainty calculations in the certification of reference materials. 1. Principles of analysis of variance, Springer, 2000.

#IBAF00005

## CARACTÉRISATION DE SCINTILLATEURS À PARTIR DE PROTONS DE 3MEV ISSUS DE LA PLATEFORME AIFIRA

A. Huber<sup>1,\*</sup>, F. Hannachi<sup>1</sup>, M. Huault<sup>2</sup>, J. Jouve<sup>1</sup>, A. Maitrallain<sup>1</sup>, P. Nicolai<sup>2</sup>, D. Raffestin<sup>2</sup>,  
S. Sorieul<sup>1</sup>, M. Tarisien<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LP2IB - Gradignan (France)

<sup>2</sup> CELIA - Talence (France)

\* [huber@lp2ib.in2p3.fr](mailto:huber@lp2ib.in2p3.fr)

Les grandes installations laser Pétawatt de recherche capable de tirer une fois par minute voire même à quelques Hertz sont en cours de démarrage. Un verrou doit cependant être levé concernant la détection en temps réel des particules émises lors d'un tir laser sur cible. En effet des perturbations électromagnétiques intenses sont émises sous la forme d'une impulsion électromagnétique (EMP) et d'un flash de rayons X causant l'aveuglement voire la destruction des détecteurs de particules communément utilisés [1]. C'est pour cela que des détecteurs passifs (activation nucléaire [2], écrans phosphorescents [3], ...) sont encore utilisés aujourd'hui. Ces détecteurs à localisation sont ensuite extraits des chambres d'expérience et analysés en quelques minutes (impossible avec des hauts taux de répétition). L'objectif est donc de trouver une alternative aux détecteurs passifs pour que les spectromètres dispersifs puissent être utilisés à haut taux de répétition.

Des études ont pu être menées pour utiliser des détecteurs actifs couplant un scintillateur et une caméra. De nombreuses simulations GEANT4 [4] avec incorporation de modèles optiques ainsi que des mesures sur la plateforme AIFIRA [5] ont été réalisées afin de proposer une solution viable pour ce type de détecteurs.

La présentation abordera le contexte de recherche, la mise en place des simulations optiques, les mesures par faisceaux réalisées ainsi que les résultats obtenus.

### Références

- [1] Scintillators in high-power laser-driven experiments ; M.Tarisien, et al. ; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol 65, issue 8, p.2216-2219 (2018)
- [2] NATALIE : a 32 detector integrated acquisition system to characterize laser produced energetic particles with nuclear techniques ; M.Tarisien, et al. ; Rev.Sci.Instr. 82, 023302 (2011)
- [3] Response functions of Imaging Plates to photons, electrons and 4He particles ; T.Bonnet, et al. ; Rev. Sci. Instrum. 84, 103510 (2013)
- [4] Geant4 - A Simulation Toolkit, S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 (2003) 250-303
- [5] Barberet, P., Jouve, J., Sorieul, S. et al. AIFIRA: a light ion beam facility for ion beam analysis and irradiation. Eur. Phys. J. Plus 136, 67 (2021). DOI : 10.1140/epjp/s13360-020-01045-9

### Remerciements

This work is supported by the Region Nouvelle Aquitaine (AAPR2022-2021-17029010 VALERIA); and the authors acknowledge the financial support of the IdEx University of Bordeaux / Grand Research Program 'GPR LIGHT'. The AIFIRA facility is financially supported by the CNRS, the university of Bordeaux and the Région Nouvelle Aquitaine. We thank the technical staff members of the AIFIRA facility P. Alfaut, J. Jouve and S. Sorieul.

#IBAF00016

## LE RETOUR VERS LE FUTUR DES ANALYSES IBA SUR LA PLATEFORME JANNUS SACLAY : DES PREMIÈRES MESURES ORIGINALES

**B. Ridard\***, G. Gutierrez, C. Bernard, P. Billaud, D. Bossu, H. Martin, F. Nozais, G. Sagnes

JANNuS Saclay (CEA-Service de Recherche en Corrosion et Comportement des Matériaux, SRMP, Université Paris-Saclay) - Gif-Sur-Yvette (France)

\* [benoit.ridard@cea.fr](mailto:benoit.ridard@cea.fr)

Durant l'année 2023, la plateforme JANNuS Saclay (S2CM/SRMP) s'est dotée d'un nouveau dispositif d'analyses par faisceaux d'ions (IBA) composé d'une ligne ainsi que d'une chambre d'analyse complètement instrumentée avec des détecteurs de dernière génération (4 détecteurs, 1 système de manipulation motorisé sur 5 axes, 1 sas d'introduction d'échantillon manuel et 1 caméra). Suite à la phase de montage réalisée par l'équipe technique JANNuS, la chambre IBA est aujourd'hui opérationnelle.

L'équipe JANNuS a, par ailleurs, effectué ses premières mesures RBS en mode canalisé en validant complètement le nouveau dispositif expérimental ainsi que le programme d'acquisition permettant d'effectuer toutes les étapes de mesures dans ce mode canalisé. Les premières mesures sur des échantillons d'UO<sub>2</sub> monocristallins irradiés aux ions ont mis en évidence une évolution de l'endommagement en fonction du type de perte d'énergie. Nous avons poursuivi en 2024, avec des expériences de faisabilité sur le sous-réseau oxygène, via des analyses par réaction nucléaire (NRA) en mode canalisé, sur ces mêmes échantillons de référence.

Cette communication va présenter, dans un premier temps, les caractéristiques et les atouts de ce nouveau dispositif, puis dans un second temps, les premiers résultats des analyses RBS/NRA en mode canalisé sur des échantillons UO<sub>2</sub> de référence.

### Références

Site web de la plateforme : <https://jannus.in2p3.fr/jannus-saclay/>



Figure 1 : Endstation

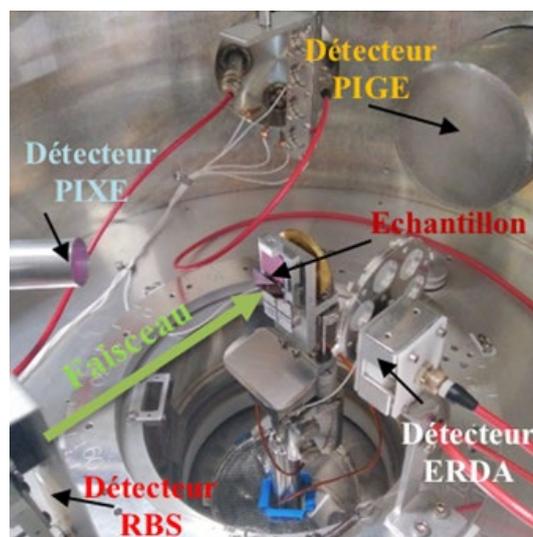


Figure 2 : Intérieur de la chambre IBA

### Conférence invitée

## LES DÉFAUTS D'IRRADIATION PARAMAGNÉTIQUES DES ARGILES : NATURE, STABILITÉ ET APPLICATIONS EN SCIENCES DE LA TERRE

**T. Allard, M. Mathian, Ö. Ataytür, E. Balan**

*Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux et de Cosmochimie, Sorbonne Université, Paris (France)*

Les argiles sont des silicates en feuillets finement divisés qui sont ubiquistes à la surface de la Terre, que ce soit dans les sols, les sédiments ou les systèmes hydrothermaux. Un nombre croissant mais encore modeste d'études depuis les années 70 a permis de révéler des défauts ponctuels paramagnétiques produits par irradiation naturelle ou artificielle dans plusieurs types d'argiles (kaolinite, smectite, illite, sudoite). Il s'agit principalement de trous électroniques localisés sur des ions d'oxygène (défauts O<sup>-</sup>) de la structure des argiles. Dans la kaolinite, argile simple et commune, plusieurs défauts sont maintenant connus dont l'un, nommé centre A, est stable à température ambiante à l'échelle des temps géologiques. Pour ces raisons, un protocole a été développé pour déterminer la dose de rayonnements reçue dans des échantillons naturels à partir de la mesure de la concentration en défauts par spectroscopie de résonance paramagnétique électronique puis d'un étalonnage par irradiation artificielle. Ces irradiations ont été effectuées avec des ions He<sup>+</sup> de 1,5 MeV sur ARAMIS (IJCLab, Orsay) pour simuler l'action des rayonnements alpha issus des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, principales sources de radioactivité dans de nombreux géosystèmes avec parfois le <sup>40</sup>K. En effet, dans ces chaînes de désintégration, les rayonnements alpha (d'une énergie moyenne de 5 MeV) correspondent à 90 % du débit de dose naturel. De plus, des irradiations avec des rayonnements gamma du <sup>60</sup>Co (CENG, Grenoble) et des faisceaux d'électrons sur l'accélérateur Van de Graaf du LSI, (Palaiseau) ont aussi été effectuées et montrent des efficacités de production de défauts comparables, si bien que les irradiations aux He<sup>+</sup> sont maintenant utilisées pour simuler l'action de tous les rayonnements ionisants naturels.

On montrera dans un premier temps les résultats d'études de stabilité thermique (via des recuits isothermes) des centres A produits naturellement ou artificiellement. Un formalisme classique permet de montrer que les cinétiques de guérison sont du deuxième ordre, et de déterminer l'énergie d'activation (2,0 – 2,6 eV) ainsi que d'extrapoler la demi-vie des défauts à 300 K, qui est supérieure à 10<sup>12</sup> ans pour les centres A quel que soit leur mode de production. Les défauts artificiels sont similaires aux naturels, et ces derniers sont donc stables tant que l'argile est stable, ce qui renforce le protocole utilisé dans les applications en sciences de la Terre. Les demi-vies de défauts d'irradiation extrapolées à température ambiante sont moindres dans les illites (entre 1,9 x 10<sup>9</sup> et 29 x 10<sup>9</sup> ans) et plus faibles dans les smectites (de l'ordre de 3000 ans) étudiées.

Deux applications majeures ont été développées dans notre laboratoire depuis les années 90, lesquelles reposent en grande partie sur des irradiations aux He<sup>+</sup>. Un exemple dans chacune des deux applications sera détaillé.

L'étude des défauts d'irradiation dans le cadre du stockage de déchets nucléaires à haute activité en milieu argileux. Il s'agit là de déterminer l'endommagement des argiles sous rayonnement, ou encore de visualiser des migrations de radioéléments enregistrées par les argiles dans des analogues naturels de sites de stockage. L'exemple choisi montre que la dose enregistrée par les kaolinites dans l'analogue naturel de Nopal au Mexique (gisement d'uranium) permet de révéler un bilan de migrations de radioéléments qui n'étaient pas perçues par des analyses géochimiques ou minéralogiques classiques.

La datation de kaolinites dans des profils de latérites ou des sédiments en Inde, Brésil (Amazonie), et Australie pour mieux comprendre l'évolution des surfaces continentales. La méthodologie de datation par RPE a pu être calibrée récemment en comparant des âges « RPE » et des âges obtenus avec des méthodes indépendantes sur une large gamme de temps, avec des argiles formées entre le Quaternaire et le Protérozoïque il y a 1,3 milliards d'années. Par ailleurs, la datation de profils latéritiques montre que la formation des kaolinites peut remonter à plusieurs millions, voire plusieurs dizaines de millions d'années. Des phases discrètes d'altération sont révélées, que l'on tente de mettre en relation avec des épisodes paléoclimatiques ou géodynamiques globaux ou régionaux (mise en place d'un régime de mousson en Inde, phases de surrection des Andes...).

#IBAF00014

## RECHERCHE SUR LA QUALITÉ DE L'AIR EN UTILISANT DES FILTRES PASSIFS TEL QUE DES FEUILLES, MOUSSE ET TRONC D'ARBRE GRÂCE À L'ANALYSE PAR FAISCEAU D'IONS

P. Couture<sup>1,\*</sup>, D. Wu<sup>2</sup>, R. Webb<sup>1</sup>, V. Palitsin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Surrey Ion Beam Centre, University of Surrey (Royaume-Uni)

<sup>2</sup> Comp Sci & Elec Eng, University of Surrey (Royaume-Uni)

\* [p.couture@surrey.ac.uk](mailto:p.couture@surrey.ac.uk)

Les conditions environnementales continue de susciter des inquiétudes avec de plus en plus de population affecter par les changements climatiques et la pollution, une estimation de l'ordre de million de personnes autour du globe meurent en raison de la piètre qualité de l'air [1]. Des projets pour l'amélioration de la qualité de l'air à l'intérieur et à l'extérieur tel que des barrières vivantes ériger autour de parc sont à l'étude [1,2,3,4]. Ce projet vise à explorer le potentiel des plantes, mousse et arbres comme source d'indication qualitative de source de pollution ainsi que la quantification de ces sources de pollution à l'aide d'analyse par faisceau d'ion (IBA); rétrodiffusion de Rutherford (RBS), émission de rayon-x générer par des particules incidentes (PIXE). Des filtres à air à base de PTFE sont aussi disponible pour confirmer les résultats d'analyse des échantillons de plantes. Cette étude cherche aussi à identifier les sources potentielles de pollution afin d'améliorer la compréhension de la dynamique environnementale à Guildford. Guildford est une petite ville situer à moins de 50 km à l'ouest du centre-ville de Londres. Les sites de collecte d'échantillons ont été choisis afin de fournir des informations complémentaires aux donnés disponibles sur les NOx situé le long de l'autoroute passant au milieu de Guildford. Des sites de collecte ont aussi été choisi le long du chemin de fer afin d'avoir une meilleure diversité des sources potentielles de pollution en ville. D'autres sites ont été choisi afin d'avoir des échantillons de control pour comparaison, des régions avec un potentiel de pollution beaucoup plus faible comme des parcs. Pour cette présentation, nous allons vous montrer les derniers résultat qualitatif et quantitatif des indicateurs de pollution sur les échantillons collecter.

### Références

- [1]Weerakkody U, Dover JW, Mitchell P, Reiling K. Particulate matter pollution capture by leaves of seventeen living wall species with special reference to rail-traffic at a metropolitan station. *Urban forestry & urban greening*. 2017 Oct 1;27:173-86.
- [2]Weerakkody U, Dover JW, Mitchell P, Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics. *Science of the Total Environment*. 2018 Sep 1;635:1012-24.
- [3]Sheweka S, Magdy AN. The living walls as an approach for a healthy urban environment. *Energy Procedia*. 2011 Jan 1;6:592-9
- [4]Mannan M, Al-Ghamdi SG. Investigating environmental life cycle impacts of active living wall for improved indoor air quality. *Building and Environment*. 2022 Jan 15;208:108595.

#IBAF00015

## DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME D'ANALYSE MICROSONDE IBA AU LARN (UNAMUR) : APPLICATION À L'ÉTUDE DE COLORATIONS EXCEPTIONNELLES DANS LES SPÉLÉOTHÈMES

L. Baseil<sup>1,\*</sup>, T. Tabarrant<sup>1</sup>, M. Vlieghe<sup>2</sup>, J. Yans<sup>2</sup>, J.L. Colaux<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Analyses par Réactions Nucléaires (LARN), Université de Namur, Namur (Belgique)

<sup>2</sup>Institute of Life, Earth and Environment (ILEE), Université de Namur, Namur (Belgique)

\* [lucas.baseil@unamur.be](mailto:lucas.baseil@unamur.be)

Les spéléothèmes (concrétions de CaCO<sub>3</sub> formées dans les grottes, notamment les stalactites et stalagmites) sont naturellement de couleur blanche à crème. Il arrive cependant que certains arborent des couleurs particulières (jaune, rouge, vert, bleu, noir...); les causes de ces colorations sont multiples et encore assez peu connues. L'une des causes possibles est la présence dans la concrétion d'éléments métalliques, en substitution dans la calcite ou l'aragonite et/ou sous forme de phases minérales distinctes (parfois très petites et localisées) [1]. Or, il arrive fréquemment que la coloration ne soit pas uniformément répartie dans les concrétions, ce qui peut être dû à une arrivée discontinue des fluides riches en métaux, rendant les analyses sur roches totales imprécises. Ceci met en évidence l'importance de l'analyse élémentaire avec une bonne résolution spatiale et une bonne sensibilité pour l'étude de la coloration des spéléothèmes.

Pour ce travail, nous avons choisi d'étudier un échantillon de spéléothème issu de la grotte de Malaval (les Bondons, Lozère, France) à l'aide du système d'analyse microsonde IBA récemment développé au LARN. Des cartographies bidimensionnelles PIXE ont été réalisées sur plusieurs zones de l'échantillon, avec une résolution latérale de l'ordre de 30 µm. L'objectif de cette étude est double : d'une part obtenir des informations sur les minéralisations Pb-Zn qui abondent dans la région de Lozère et qui sont vraisemblablement à l'origine des variations de couleurs du spécimen et, d'autre part, valider notre système d'analyse en comparant ces résultats à ceux obtenus via d'autres méthodes analytiques (e.g. LA-ICP-MS avec un faisceau de 50 µm).

Notons que ce travail s'inscrit dans une volonté plus large du Département de Physique de l'UNamur de développer des outils et des compétences utiles dans le domaine des sciences du patrimoine. À terme, le principal objectif de notre système d'analyse microsonde consiste ainsi à étudier la composition élémentaire de fibules émaillées gallo-romaines afin de répondre à différentes questions quant à leur production et à l'origine des matériaux qui les constituent [2].

### Références

[1] M. Vlieghe et al., "Ni-rich mineral nepouite explains the exceptional green color of speleothems", *Sci Rep*, vol. 113, n°1, p.15017, sept. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-41977-7.

[2] M. Callewaert, « Les fibules émaillées en Gaule Belgique et Germanie Inférieure : chronologie, production et consommation », Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, 2016.

### Conférence invitée

## AGLAE, UN OUL D'EXCELLENCE POUR IDENTIFIER L'ORIGINE ET LES PROCESSUS DE PRODUCTION DES VITRAUX FRANÇAIS

### C. Loisel

*Ingénieure de Recherche, responsable du pôle scientifique Vitrail  
Coordinatrice du Groupe de travail Verre du chantier scientifique CNRS / Ministère de la Culture de Notre-Dame de Paris*

*Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques  
29 rue de Paris - 77420 Champs-sur-Marne (France)*

L'accélérateur Grand Louvre d'analyse élémentaire, New AGLAE, localisé au Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), est un outil d'excellence du ministère de la culture, permettant l'analyse des œuvres d'art comme les vitraux. La France possède plus de vitraux anciens du moyen-âge que l'ensemble du reste du monde, comme le disait Louis Grodecki, grand historien spécialiste de l'art médiéval. Au sein du ministère de la culture, la Conservation Régionale des Monuments Historiques (CRMH) et le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH) ont donc la charge et le devoir de conserver-restaurer les vitraux suivant les règles édictées dans la charte de Venise et les directives du Corpus Vitrearum international. Lors des chantiers de restauration, différents objectifs sont fixés : le nettoyage et les traitements de conservation, la mise en place de verrière de protection pour une conservation préventive optimale, les recherches historiques et les analyses chimiques pour approfondir la connaissance de ces œuvres. Le projet national d'analyse des vitraux (FR-Stained Glass) coordonné par le pôle scientifique Vitrail du LRMH, en collaboration avec le C2RMF, est un projet sur du long terme, débuté en 2006, s'insérant dans les opérations de restauration de monuments historiques majeurs telles que la Sainte-Chapelle de Paris, la cathédrale de Chartres, l'église de Walbourg). Les analyses à l'aide d'AGLAE (PIXE, PIGE, RBS), non invasives et non destructives, permettent d'obtenir la composition chimique quantitative des verres et des peintures sur des vitraux de différentes périodes allant du XII<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle. L'ensemble des résultats, constitue progressivement une base de données pouvant répondre, en complément des documents des archives, aux questions posées par les scientifiques de la conservation et des historiens spécialistes du vitrail. Classiquement, les interrogations portent sur la compréhension des processus d'altération, l'identification de la coloration des verres, l'origine des pièces de verres. Au fur et à mesure que la base de données s'enrichit, des comparaisons géographique ou/et temporelle des sites deviennent possibles. Ce projet de recherche participe fortement à une meilleure connaissance du patrimoine verrier français.

#IBAF00020

## L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU SERVICE DU TRAITEMENT DE L'IMAGERIE 3D TOTAL-IBA : APPLICATION AUX VITRAUX DE LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE PARIS

A. Tazzioli<sup>1,\*</sup>, Q. Lemasson<sup>2</sup>, A. Girard<sup>3</sup>, C. Loisel<sup>4</sup>, L. Pichon<sup>2</sup>, B. Moignard<sup>2</sup>, C. Pacheco<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Recherche de Chimie Paris, Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - Paris (France)

<sup>2</sup> Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Lab-Bc (uar 3506) - Paris (France)

<sup>3</sup> EDF R&D - Chatou (France)

<sup>4</sup> Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Centre de Recherche sur la Conservation (UAR 3224) - Champs-Sur-Marne (France)

\* [astrid.tazzioli@culture.gouv.fr](mailto:astrid.tazzioli@culture.gouv.fr)

L'utilisation de techniques d'analyse par faisceau d'ions, en tant qu'analyses non invasives et non destructives, est parfaitement adaptée pour les objets du patrimoine. Des analyses ponctuelles ne suffisent pas pour donner une composition représentative d'un matériau hétérogène. Il est alors nécessaire d'analyser une zone de plusieurs millimètres carré par 2D-IBA. La composition chimique issue du PIXE nous permet d'interpréter les spectres RBS et ainsi de reconstruire la stratigraphie de la surface des objets. Cependant, coupler ces différentes techniques d'analyses en 2D crée des jeux de données contenant plusieurs milliers de spectres. Le traitement PIXE [1] puis RBS pixel par pixel est automatisable mais reste très chronophage et entaché d'une grande incertitude due au faible taux de comptage de chaque pixel, malgré un long temps d'acquisition.

La première approche pour traiter ces jeux de données consiste à diminuer le nombre de spectres à traiter, en reconnaissant les zones localement homogènes par clusterisation des spectres ou segmentation des pixels. Le spectre caractéristique de chaque groupe aura un meilleur rapport signal sur bruit et est finement traité. Si d'autres laboratoires ont mené des travaux de clusterisation d'une seule technique, notamment le 2D-PIXE [2,3] ou 2D-XRF [3], l'originalité de la recherche menée ici consiste à effectuer cela sur la combinaison des techniques 2D-PIXE et 2D-RBS. Afin de développer et valider cette méthodologie, des échantillons de référence ont été fabriqués et analysés. A la place de traiter des dizaines de milliers de spectres, cette méthode utilisant des outils d'intelligence artificielle, nous permet d'extraire et de ne traiter qu'un petit nombre de spectres peu bruités et réellement représentatifs du matériau. La répartition spatiale, à la fois en surface mais également en profondeur, de ces informations avec une bonne précision peut ensuite être représentée en 3D.

Afin de mieux comprendre l'histoire des techniques de fabrication des vitraux de la cathédrale Notre-Dame de Paris et permettre la comparaison avec d'autres vitraux, il est indispensable de déterminer leur stratigraphie en caractérisant les décors peints à leur surface. Cette communication orale présentera la méthodologie développée et les premiers résultats obtenus sur ces vitraux.

### Références

[1] L. Pichon, T. Calligaro, Q. Lemasson, B. Moignard, C. Pacheco, Nucl. Instr. Methods (2015).

[2] T. F. Silva, G. F. Trindade, M. A. Rizzutto, X-Ray Spectrom. (2018) .

[3] I.B. Mihalić, S. Fazinić, M. Barac, A.G. Karydas, A. Migliori, D. Doračić, V. Desnica, D. Mudronja, D. Krstić, J. Anal. At. Spectrom. (2021).

#IBAF00009

## S'ENTRAÎNER À LA CRISE !

### M. Courselaud

C2RMF/DCP - Paris (France)

[marie.courselaud@culture.gouv.fr](mailto:marie.courselaud@culture.gouv.fr)

L'alarme retentit... le personnel du laboratoire quitte les lieux dans un silence inhabituel... Des silhouettes en scaphandre orange pénètrent les couloirs, les rires de la cafétéria laissent place aux sons lents des respirateurs, des tentes de décontamination se hissent sur le parvis du C2RMF. Futur dystopique ou réalité ? Rassurez-vous, il s'agit d'un exercice !

Parce que le risque 0 n'existe pas, parce qu'une catastrophe est pire en l'absence de préparation, parce que la protection des personnes et des œuvres qui circulent au laboratoire est capital, le C2RMF a organisé en avril 2024 un exercice incendie ayant pour objet : AGLAE.

L'intérêt d'un tel exercice est double : à la fois pour tirer les leçons qui permettront d'améliorer l'organisation du laboratoire tout en réévaluant les risques mais aussi pour entraîner les pompiers qui manœuvrent rarement dans ce type d'installation. Il faut noter que c'est la première fois en France qu'un exercice NRBC dans un environnement patrimonial était réalisé.

Sujet atypique et peu traité, cet exercice soulève plusieurs problématiques :

Approche pompier différente d'un incendie classique (cinétique lente pouvant avoir un impact sur la gestion des victimes et des œuvres)

Prise en charge des œuvres potentiellement irradiées ? (Quelles procédures, quel espace de stockage)

Adaptation des équipements ? (Filtration des particules)

L'objet de cette communication vise à susciter l'intérêt d'une approche collaborative des risques, à démontrer la nécessité des exercices qui participent à améliorer la préparation de crise tant d'un point de vue organisationnel que matériel, à échanger sur les conséquences d'une défaillance grave pouvant impacter des biens culturels souvent vulnérables et les solutions pouvant être envisagées pour les personnes et les collections.

### Remerciements

Brigade de sapeurs pompiers de Paris (BSPP)

Service prévention sécurité incendie du Louvre (SPSI)

Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF)

*Conférence invitée*

## CHAMPS ÉLECTRIQUES DANS L'EAU LIQUIDE IRRADIÉE PAR DES PROTONS DE 3 MeV À DES DÉBITS DE DOSE TRÈS ÉLEVÉS

**F. Gobet**

*LP2iB, Univ. Bordeaux (France)*

Les progrès récents dans le domaine de l'irradiation par microfaisceau [1,2] ainsi qu'en microscopie électronique ou en rayons X d'échantillons liquides ou biologiques [3,4] ont relancé les études sur les effets physiques, chimiques et biologiques résultant de l'interaction entre les rayonnements ionisants et la matière à des débits de dose ultra-élevés ( $10 \text{ kGy s}^{-1}$  -  $100 \text{ MGy s}^{-1}$ ). Dans le contexte de l'imagerie à haute résolution avec ce régime extrême d'irradiation, la perturbation de l'échantillon liquide à l'extérieur du microfaisceau appliqué, par la génération de champs induits, reste une question ouverte.

En couplant l'irradiation par un microfaisceau de protons de 3 MeV avec de la microscopie par fluorescence, nous étudions les effets de l'irradiation de l'eau liquide à des doses élevées en observant le mouvement de billes de polystyrène chargées [5]. Nous mesurons une vitesse radiale des billes de l'ordre du micron par seconde à l'extérieur du faisceau de protons. En combinant une théorie électrocinétique avec des simulations des produits de réaction générés par le faisceau et leur diffusion, nous constatons que le mouvement des billes est dû à un champ électrique induit dans l'eau par le contraste de mobilité des cations et des anions produits lors de la radiolyse de l'eau.

Ce travail met en lumière la perturbation des systèmes biologiques par des radiations à haute dose et ouvre la voie à la manipulation dans l'eau de colloïdes ou de macromolécules par diffusiophorèse induite par les radiations.

[1] V. Ialyshev et al. , *ACS Omega* 7, 28182 (2022).

[2] L. Eling, et al., *Radiother. Oncol.* 139, 56 (2019).

[3] H. Wu, H. Friedrich et al., *Adv. Mater.* 32, 2001582 (2020).

[4] C. Y. Hémonnot and S. Koster, *ACS Nano* 11, 8542 (2017).

[5] F.Gobet et al., *Phys.Rev.Lett.* 131, 178001 (2023).

#IBAF00006

## ETUDE IN SITU DE LA FRAGMENTATION RADIO-INDUITE DE L'ADN EN SOLUTION AQUEUSE

R. Lienard<sup>1,\*</sup>, F. Gobet<sup>1</sup>, P. Barberet<sup>1</sup>, G. Devès<sup>1</sup>, T. Guérin<sup>2</sup>, L. Plawisky<sup>1</sup>, C. Michelet<sup>1</sup>,  
H. Sez nec<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Physique des Deux Infinis de Bordeaux-LP2I - Gradignan (France)

<sup>2</sup> Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine-LOMA - Talence (France)

\* [lienard@lp2ib.in2p3.fr](mailto:lienard@lp2ib.in2p3.fr)

Comprendre les phénomènes physiques en jeu lors de l'irradiation des molécules d'ADN par des protons est essentiel dans le cadre de la proton thérapie [1], mais également pour améliorer la protection contre les radiations cosmiques dans les missions spatiales habitées, étant donné que les protons de haute énergie constituent 90 % des radiations cosmiques [2]. Étudier la dynamique de la fragmentation de l'ADN, événement par événement, est un défi fondamental en physique pour comprendre les mécanismes de relaxation de l'énergie déposée dans le milieu après irradiation [3].

En utilisant une approche *in situ*, nous étudions les propriétés dynamiques et statistiques de la fragmentation radio-induite de l'ADN du bactériophage T4 de 167 000 paires de bases en solution aqueuse, marqué avec l'intercalant YOYO-1 et observé par microscopie de fluorescence. L'irradiation est réalisée à l'aide de la ligne microfaisceau de l'accélérateur de particules AIFIRA, qui délivre des protons de 3 MeV contrôlables en nombre, en espace et en temps, assurant une irradiation uniforme. Nous enregistrons des vidéos permettant d'observer la fragmentation de l'ADN sur une quarantaine de secondes après l'irradiation pour des fluences allant de 0 à 7000 protons/ $\mu\text{m}^2$ .

Un couplage entre machine learning et un algorithme Python de suivi particulière nous permet d'analyser l'évolution temporelle du déplacement spatial des pelottes d'ADN. Nous pouvons désormais identifier les événements de fragmentation ainsi que leurs multiplicités. A travers cette approche innovante il est possible de mesurer les probabilités de fragmentation de l'ADN double brin par dommages directs des protons. A ce jour, nous avons plus de 20 000 molécules d'ADN suivies individuellement. Après avoir présenté la méthodologie, nous discuterons de l'influence de la nature du solvant sur la fragmentation. De plus, cette technique d'analyse permet d'étudier les effets de la profondeur du plan d'imagerie dans la cible lors de l'acquisition sur les taux de fragmentation de l'ADN. Ceci ouvre des perspectives inédites sur l'étude de la fragmentation de l'ADN au voisinage du pic de Bragg.

### Références

[1] M. Durante and J. S. Loeffler, Charged particles in radiation oncology, *Nat. Rev. Clin. Oncol.* 7, 1 (2010).

[2] J. C. Chancellor et al., Predicting space radiation health risk, *npj Microgravity* 4, 8 (2018).

[3] C. Shepard et al., DNA's response to proton radiation, *Phys. Rev. Lett.*, 130(11), 118401 (2023).

#IBAF00013

## ETUDE IN SITU PAR SPECTROSCOPIE RAMAN DE L'ALTÉRATION DE BIOSIGNATURES SOUS IRRADIATION : AIDE À LA RECHERCHE DE VIE SUR MARS

F. Foucher<sup>1,\*</sup>, M. Baqué<sup>2</sup>, J.P.P. De Vera<sup>3</sup>, A. Canizarès<sup>1</sup>, R. Martellotti<sup>4</sup>, T. Sauvage<sup>1</sup>, O. Wendling<sup>1</sup>, P. Sigot<sup>1</sup>, A. Bellamy<sup>1</sup>, W. Hate<sup>1</sup>, F. Westall<sup>5</sup>

<sup>1</sup> CNRS, CEMHTI - Orléans (France)

<sup>2</sup> German Aerospace Center (DLR), Institute of Planetary Research - Berlin (Allemagne)

<sup>3</sup> German Aerospace Center (DLR), Space Operations and Astronaut Training, Mosc - Cologne (Allemagne)

<sup>4</sup> Université de Trieste - Trieste (Italie)

<sup>5</sup> CNRS, CBM - Orléans (France)

\* [frederic.foucher@cnrs.fr](mailto:frederic.foucher@cnrs.fr)

Il y a plus de 3,5 milliards d'années, la présence d'eau liquide à la surface de Mars auraient pu permettre l'apparition d'une vie microbienne primitive. Bien que les conditions soient ensuite devenues inhospitalières, des restes biologiques pourraient encore être présents à la surface de la planète rouge [1,2].

Cependant, en l'absence de champ magnétique, Mars est continuellement exposée aux particules solaires (SEP) et aux rayons cosmiques galactiques (GCR) qui peuvent pénétrer jusqu'à plusieurs mètres sous la surface et altérer, avec le temps, les molécules organiques ou d'hypothétiques traces de vie dormante ou passée [3]. La mission ExoMars de l'Agence spatiale européenne, désormais prévue pour 2028, explorera donc le sous-sol de Mars jusqu'à 2 m de profondeur, afin d'augmenter les chances de détecter des molécules organiques bien préservées par diverses techniques. En particulier, le rover est équipé d'un spectromètre Raman capable d'identifier à la fois des phases organiques et minérales, idéal pour rechercher des traces de vie présente ou fossile [4-6].

Afin d'évaluer l'effet de l'irradiation sur le signal Raman de diverses biosignatures, des molécules d'intérêt exobiologique ont été mélangées à des matrices minérales analogues de Mars avant d'être irradiées avec des protons de 2,8 MeV sur le Pelletron du laboratoire CEMHTI, au CNRS d'Orléans. Le dispositif RAMSESS (pour RAMAn SpEctroscopy for in Situ Studies) développé au laboratoire a été utilisé pour étudier les modifications du signal Raman in situ dans la chambre d'irradiation (Figure 1) [7]. Grâce à des modèles, nous avons pu comparer la dose reçue par les échantillons lors de l'irradiation au Pelletron avec celle reçue sur Mars, en profondeur et dans le temps. Ces résultats sont utiles dans le cadre de la mission ExoMars et très complémentaires de ceux obtenus lors des expériences d'irradiation réalisées à l'extérieur de l'ISS [8,9].

### Références

[1] J.-P. Bibring et al., *Science* 312, 400 (2006). [2] F. Westall, et al., *Astrobiology* 15, 998 (2015). [3] G. de Angelis et al., *Adv. Space Res.* 34, 1328 (2004). [4] F. Foucher, in *Biosignatures for Astrobiology*, Cavalazzi, B., Westall, F. (Eds.), Springer, (2019). [5] F. Foucher & F. Westall, *Astrobiology* 13:1, 57 (2013). [6] F. Foucher et al., *J. Raman Spec.* 46, 873 (2015). [7] A. Canizarès et al., *Applied Spec.* 76, 723 (2022). [8] J.-P. de Vera et al., *Astrobiology* 19:2, 145 (2019). [9] M. Baqué et al., *Sci. Adv.* 8, 36 (2022).

### Remerciements

Nous remercions le CNES pour le financement de ces travaux.

#IBAF00002

## CONCEPTION ET OPTIMISATION D'UNE FARADAY CUP DÉDIÉE À LA DOSIMÉTRIE DE FAISCEAUX DE PROTONS UHDR

L. Schoenauen<sup>1,\*</sup>, R. Coos<sup>1</sup>, J. Colaux<sup>2</sup>, A.C. Heuskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Namur Research Institute for Life Sciences (NARILIS), University of Namur - Namur (Belgique)

<sup>2</sup> Namur Institute of Structured Matter (NISM), University of Namur - Namur (Belgique)

\* [lucas.schoenauen@unamur.be](mailto:lucas.schoenauen@unamur.be)

Nous avons développé et validé un setup d'irradiation à débit de dose ultra élevé (UHDR) sur un accélérateur tandem de 2 MV (ALTAÏS) pour étudier l'effet FLASH en radiothérapie [1]. Pour répondre aux défis de dosimétrie UHDR, nous avons développé une Faraday cup (FC) dédiée comme solution indépendante du débit de dose. Grâce à des simulations de Monte Carlo, la géométrie et les matériaux utilisés pour la conception de la FC ont été optimisés pour un faisceau de protons de 4 MeV. Ce setup UHDR en trois parties intègre également un profileur de faisceau pour garantir l'homogénéité du faisceau et un chopper électrostatique pour irradier pendant des périodes courtes et précises (jusqu'à 10  $\mu$ s), étant même capable de reproduire la structure macroscopique de faisceau des accélérateurs de protons cliniques typiques tels que le S2C2 et le C230 (IBA, Louvain-la-Neuve). Le setup ainsi intégré sur la ligne d'irradiation de notre accélérateur tandem garantit un dépôt de dose avec une erreur  $\leq 5$  % pour des débits de dose allant de 100 à plus de 1 000 Gy/s [2]. L'irradiation de premiers échantillons biologique, des *Caenorhabditis elegans*, a permis la mise en évidence de l'effet FLASH en utilisant ce setup [3].

### Références

[1] C. L. Limoli and M.-C. Vozenin, 'Reinventing Radiobiology in the Light of FLASH Radiotherapy', Annual Review of Cancer Biology, vol. 7, no. 1, pp. 1–21, 2023, doi: 10.1146/annurev-cancerbio-061421-022217.

[2] L. Schoenauen, R. Coos, J. L. Colaux, and A.-C. Heuskin, 'Design and optimization of a dedicated Faraday Cup for UHDR proton dosimetry: implementation in a UHDR irradiation station', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, p. 169411, May 2024, doi: 10.1016/j.nima.2024.169411.

[3] L. Schoenauen, F.-X. Stubbe, D. Van Gestel, S. Penninckx, and A.-C. Heuskin, 'C. elegans: A potent model for high-throughput screening experiments investigating the FLASH effect', Clinical and Translational Radiation Oncology, vol. 45, p. 100712, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ctro.2023.100712.

### Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude à Tijani Tabarrant pour son indispensable soutien technique sur ALTAÏS. Tijani a non seulement fourni une aide précieuse, mais a également suivi de près le développement du projet, contribuant ainsi de manière significative à sa réussite.

*Conférence invitée*

## UNE HISTOIRE DE L'ANALYSE PAR FAISCEAUX D'IONS RAPIDES

### **I. Vickridge**

*Plateforme SAFIR, Institut des NanoSciences de Paris, UMR 7588 du CNRS et Sorbonne Université, Paris (France)*

Je présenterai une histoire, inévitablement teintée par mes expériences personnelles, de l'analyse par faisceaux d'ions. Nous suivrons en parallèle trois traces interdépendantes : celle du développement des connaissances des interactions ion-matière, celle du développement de l'instrumentation permettant de générer des faisceaux d'ions et d'observer les produits de leurs interactions avec la matière, et celle des applications de l'analyse par faisceaux d'ions.

Les traces que nous suivrons ne se termineront pas abruptement au moment présent. Rutherford, fort de sa vie de découvertes de la nature de l'atome, des réactions nucléaires – a prédit en 1932 avec Bohr, Einstein, Cockroft et autres que l'énergie libérée lors de réactions nucléaires ne serait pas exploitable dans un avenir prévisible. Ils ont été démentis par les faits dès 1939 avec la première démonstration d'une réaction de fission en chaîne par Frédéric Joliot-Curie.

Je m'aventurerai, donc, à esquisser à partir des traces du passé, quelques observations et prédictions de ce à quoi le futur de l'IBA pourrait ressembler en sachant que, si les faits me démentent rapidement, je serai en bonne compagnie !

# **SESSIONS AFFICHES**

#IBAF00012

## MOSAIC, UNE OFFRE COMPLÈTE DE FAISCEAUX D'IONS POUR LA MODIFICATION, LA SYNTHÈSE ET L'ANALYSE DE LA MATIÈRE

**C. Bachelet\*, I. Ribaud, A. Gentils**

*Université Paris-Saclay, CNRS/IN2P3, IJCLAB - Orsay (France)*

\* [cyril.bachelet@ijclab.in2p3.fr](mailto:cyril.bachelet@ijclab.in2p3.fr)

MOSAIC est une plateforme de recherche interdisciplinaire ouverte à de nombreuses disciplines scientifiques : science des matériaux, astrochimie, astrophysique, physique nucléaire, géologie, biologie, environnement. Créée en 2023, elle est le fruit de la fusion des plateformes Andromède et JANNuS-SCALP.

La plateforme se compose de différents accélérateurs (ARAMIS, IRMA, Sidonie, Andromède, Tancrede) qui peuvent produire des ions ou des agrégats, mono ou multichargés, de plus d'une soixantaine d'éléments, dans une gamme d'énergie entre 100eV et 32 MeV. La plateforme est dotée d'équipements permettant d'effectuer de l'implantation/irradiation de matériaux à des températures allant de 77 à 1000K avec la possibilité d'analyse par microscopie électronique en transmission in situ, de réalisation de dépôts à haute pureté isotopique, d'études d'interactions ions-matière (réactions nucléaires, interaction sur des analogues de matériaux interstellaires), d'analyses par faisceau d'ions (RBS/C, ERDA, PIXE) ou bien des analyses MeV ToF-SIMS avec la sonde de nanoparticules d'or. Dans les prochaines années, l'offre de faisceau sera complétée par Némée, l'implanteur 400kV récemment déménagé de l'IP2I (ex-IPN) de Lyon, et en cours d'adaptation et réinstallation à IJCLab. Cette contribution présente les équipements de la plateforme dans son ensemble, ainsi que quelques exemples de résultats représentatifs.

### Remerciements

Remerciements à toute l'équipe MOSAIC et au soutien scientifique: Cédric Baumier, Jérôme Bourçois, Philippe Benoit-Lamaitrie, Bryan Bragance, François Daubisse, Laurent Delbecq, Silvin Hervé, Christine Oriol, Florian Pallier, Sandrine Picard, Serge Della Negra, Frederico Garrido, Stéphanie Jublot-Leclerc

#IBAF00024

## DETECTION OF LITHIUM TRACES: STUDY ON CALIBRATION STANDARDS BY ION BEAM ANALYSIS

V. Thoréton\*, D. Truffier-Boutry, F. Pierre<sup>1</sup>, J.P. Barnes

CEA LETI - Grenoble (France)

\*[vincent.thoreton@cea.fr](mailto:vincent.thoreton@cea.fr)

Lithium-based materials, whether thin layers or bulk material, are of great interest for varied applications (batteries, RF components...). However, their cohabitation with other “standard” materials for microelectronics requires special attention. As a precaution, these materials are “confined” on dedicated manufacturing lines, without full knowledge of their potential effect on the manufactured devices. One step on the way to studying the potential impact on electrical performances on devices is to be able to detect and follow traces of lithium. Many studies on Lithium exist, most of them concerning energy storage materials involving high lithium concentration. In such context, specific precautions and methodologies were implemented. These must be defined in the frame of studies related to microelectronics taking into account lower lithium concentrations. This will allow an in depth study of the mechanisms and kinetics of lithium diffusion as well as evaluating its impact on the performance of microelectronic devices such as memories and metal–oxide–semiconductor (MOS).

We initiated methodology development in order to identify and quantify lithium in various calibration standards, corroborating the results from sensitive mass spectrometry (MS) technics such as secondary ion MS (SIMS), time of flight SIMS (ToF-SIMS), vapour phase decomposition inductively coupled plasma MS (VPD-ICPMS) and nuclear reaction analysis (NRA).

### Remerciements

This work, carried out on the Platform for Nanocharacterisation (PFNC), was supported by the “Recherche Technologique de Base” and “France 2030 - ANR-22-PEEL-0014” programs of the French National Research Agency (ANR)

#IBAF00017

## DE LA CRISTALLISATION À L'AMORPHISATION : PROJET DE FORMATION SUR L'IRRADIATION ET LA CARACTÉRISATION DE MATÉRIAUX MODÈLES POUR ÉTUDIANTS OU JEUNES CHERCHEURS

S. Pellegrino<sup>1</sup>, B. Ridard<sup>2</sup>, G. Gutierrez<sup>2</sup>, J.L. Bechade<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA-INSTN-UES-LRS - Gif sur Yvette (France)

<sup>2</sup> CEA-DES-SRMP-JANNuS - Gif sur Yvette (France)

[stephanie.pellegrino@cea.fr](mailto:stephanie.pellegrino@cea.fr)

En 1964, l'Institut national des sciences et technologies nucléaires (INSTN, Saclay, France) a acquis un accélérateur AN-2000 Van de Graaff de HVÉE. Des projets de recherche et de formation des étudiants ont été lancés pour le premier cycle (école d'ingénieurs, master, etc.), les doctorants et les stagiaires postdoctoraux [1]. En 2007, l'accélérateur a été transféré sur la plate-forme JANNuS (DES-SRMP, Saclay, France) [2] pour effectuer des irradiations multiples (avec des possibilités d'irradiation à faisceau simple, double et triple) et également pour fournir des activités pratiques sur l'interaction ion-matière et la science des matériaux. En 2015, l'accélérateur Van de Graaff a été remplacé par un Pelletron NEC de 2,5 MeV [3]. En 2023, cet accélérateur, maintenant appelé PANDORE, est équipé d'une toute nouvelle ligne d'analyse de faisceaux d'ions NEC. Cette ligne est installée et testée au laboratoire JANNuS.

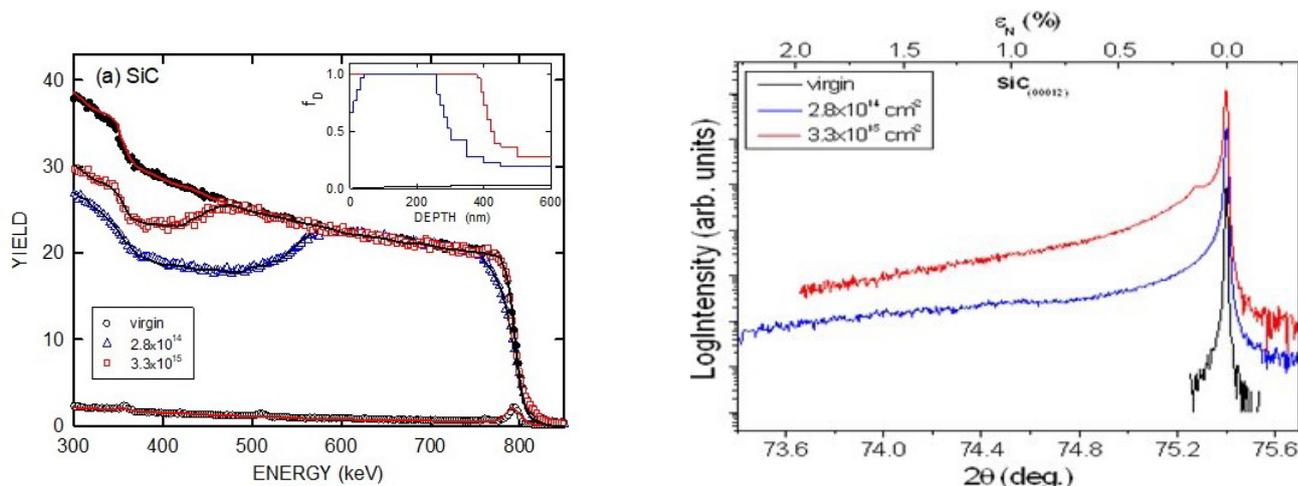
En collaboration avec l'INSTN (pour l'éducation et la formation) et la DES-SRMP (pour la recherche), nous prévoyons d'offrir à nos étudiants un mini-projet de 5 jours basé sur l'irradiation d'un matériau modèle et sa caractérisation post-irradiation en utilisant IBA (RBS-Channelling, NRA) combiné avec la Diffraction des Rayons X (DRX), la microscopie MEB et la spectroscopie Raman. L'objectif est d'observer les trois niveaux d'irradiation (cristallin vierge, intermédiaire/amorphe, complètement amorphe) pour un même matériau et de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque méthode de caractérisation. La première partie consistera à simuler les trois irradiations avec SIMNRA, SRIM et IRADINA, dans la seconde partie à irradier expérimentalement les échantillons et dans la troisième partie à caractériser en utilisant la RBS-cannalisée, PIXE, NRA et d'autres méthodes analytiques telles que DRX, MEB et Raman.

### Références

[1] Beck et al., Nucl. Instr. and Meth. B219-220, 394-399 (2004).

[2] Pellegrino et al., Nucl. Instr. and Meth. B 273, p 213-217, (2012).

[3] Beck et al., J. of Mat. Research 30, 1183-1194, (2015).



#IBAF00003

## IBIL : UNE ALTERNATIVE POUR LE SOURCING D’OBSIDIENNE EN MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE ?

**S. Sorieul<sup>1,\*</sup>, J. Jouve<sup>1</sup>, S. Dubernet<sup>2</sup>, F.X. Le Bourdonnec<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> LP2IB, UMR 5797, Université de Bordeaux, CNRS, Gradignan, France. - Gradignan (France)

<sup>2</sup> Archéosciences Bordeaux, UMR 6034, Université Bordeaux Montaigne, CNRS, Université de Bordeaux, EPHE-PSL, Pessac, France. - Pessac (France)

\* [sorieul@lp2ib.in2p3.fr](mailto:sorieul@lp2ib.in2p3.fr)

L’obsidienne est un marqueur idéal pour tracer la mobilité et/ou les échanges des groupes humains pré- et protohistoriques à travers la détermination de la composition en éléments traces. Les analyses par faisceau d’ions et notamment les caractérisations par PIXE ont permis de mener avec succès des recherches de provenance dans le Pacifique mais également en d’Amérique andine et en zone péri-méditerranéenne (Poupeau et al., 2007).

Nous présentons ici une étude exploratoire qui vise à utiliser la ionoluminescence (IBIL : Ion-Beam Induced Luminescence) des obsidiennes pour discriminer les quatre îles-sources potentielles de Méditerranée occidentale (Lipari, Palmarola, Pantelleria et Sardaigne). Dans cette optique, l’interaction du faisceau sur des sections polies d’obsidienne a été observée in situ par une caméra dédiée installée sur la ligne de faisceau extrait de la plateforme AIFIRA, l’installation fournissant l’essentiel des techniques pour l’analyse en « routine » des échantillons massifs (Barberet et al., 2021). Les observations en IBIL ont été corrélées avec les analyses PIXE effectuées simultanément et qui servent d’analyse de référence pour la comparaison.

La stratégie retenue pour cette étude exploratoire, le dispositif utilisé et les résultats obtenus seront présentés dans un poster.

### Références

Barberet, P., Jouve, J., Sorieul, S., Alfaut, P., & Mathieu, L. (2021). AIFIRA: a light ion beam facility for ion beam analysis and irradiation. *The European Physical Journal Plus*, 136, 67, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-01045-9>

Poupeau, G., Le Bourdonnec, F.-X., Dubernet, S., Scorzelli, R. B., Duttine, M., & Carter, T. (2007). Tendances actuelles dans la caractérisation des obsidiennes pour les études de provenance. *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 31, 79-86, <https://doi.org/10.4000/archeosciences.772>

#IBAF00018

## DE LA PLANTE À L'ACCÉLÉRATEUR, EN PASSANT PAR LA TOILE DE PIERRE SOULAGES : LE PARCOURS D'UNE FIBRE DE LIN, DES CHAMPS AU LABORATOIRE

L. Beck<sup>1,\*</sup>, I. Caffy<sup>1</sup>, P. Hérou-de La Grandière<sup>2</sup>, C. Coustet<sup>3</sup>, M. Thoury<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Mesure du Carbone 14 (LMC14) - Gif-Sur-Yvette (France)

<sup>2</sup> Atelier La Grandière - Nîmes (France)

<sup>3</sup> CNRS/IPANEMA - St Aubin (France)

\* [lucile.beck@cea.fr](mailto:lucile.beck@cea.fr)

Le lin occupe une place importante dans l'art et pour les artistes. Les fibres de la plante sont utilisées pour fabriquer la toile de lin qui sert de support et les graines sont transformées en huile de lin qui sert de liant à la peinture à l'huile. Le lin est préféré à d'autres tissus pour sa résistance, sa durabilité et son intégrité archivistique. Le lin pousse rapidement et est récolté après environ 100 jours.

En raison de la croissance rapide du lin, la toile et l'huile de lin sont considérées comme de bons candidats pour la datation des œuvres d'art peintes par la méthode du carbone 14 par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) (Caforio et al. 2014. Hendriks et al. 2019 ; Beck et al. 2022ab). Cependant, Brock et al. en 2019 ont mesuré un décalage de 2 à 5 ans, parfois plus, entre la date carbone 14 - qui correspond à la récolte des fibres végétales – et la date de réalisation de la peinture, en se basant sur l'étude d'œuvres d'art de divers artistes scandinaves du milieu du 20<sup>e</sup> siècle.

Dans cette communication, une approche similaire est proposée à partir des peintures d'un artiste unique, Pierre Soulages (1919-2022) (Hérou-de La Grandière et al. 2023). Ce projet est l'occasion d'une campagne intensive d'analyses de nombreux échantillons de toiles pré-apprêtées provenant du revers des œuvres (Coustet et al. 2023). Le choix s'est porté sur cet artiste qui donnait comme titres à ses tableaux la date exacte de leur achèvement.

26 fibres et 10 échantillons de peinture, prélevés sur des tableaux datés de 1956 à 1986 ont été datés par <sup>14</sup>C par SMA. Les résultats montrent un décalage de 2 et 7 ans jusqu'en 1968, et de plus de 10 ans de 1971 à 1986.

Cette précision est rendue possible grâce à la spectrométrie de masse par accélérateur qui permet de prélever de très petits échantillons (moins de 10 milligrammes) et à la courbe d'étalonnage atmosphérique du « pic des bombes » qui fournit des incertitudes de quelques années.

### Références

Beck et al. 2022a. Forensic Science International 333:111214.

Beck. 2022b. Physics 4(2):462-472.

Beck et al. 2023. Radiocarbon

Brock et al. 2019. Radiocarbon 61:39-49.

Coustet et al. 2023. SR2A 2023 – Munich, Germany

Caforio et al. 2014. Eur. Phys. J. Plus 129:1-6.

Hérou-de La Grandière et al. 2023. Recherche et Restauration: histoires, pratiques et perspectives, 2023.

Hendriks et al. 2019. PNAS 116:13210-13214.

#IBAF00028

## DEVELOPPEMENT DE RESEAUX NEURONAUX ARTIFICIELS POUR LE TRAITEMENT DE SPECTRES RBS D'OBJETS PATRIMONIAUX A NEW AGLAE

**A. Tazzioli<sup>1,\*</sup>, S. Jaoui<sup>2,\*</sup>, Q. Lemasson<sup>3</sup>, A. Girard<sup>4</sup>, J.P. Berthet<sup>5</sup>, L. Pichon<sup>3</sup>, C. Pacheco<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - Paris (France)

<sup>2</sup> Sorbonne Universités - Paris (France)

<sup>3</sup> UAR3506 CNRS/Ministère de La Culture/ENSCP-Université PSL, Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - Paris (France)

<sup>4</sup> EDF R&D - Chatou (France)

<sup>5</sup> UAR3506 CNRS/Ministère de La Culture/ENSCP-Université PSL - Paris (France)

[astrid.tazzioli@culture.gouv.fr](mailto:astrid.tazzioli@culture.gouv.fr)

[solaine.jaoui@etu.sorbonne-universite.fr](mailto:solaine.jaoui@etu.sorbonne-universite.fr)

Les objets analysés en sciences du patrimoine sont souvent très hétérogènes et présentent des structures stratifiées complexes. Les mesures ponctuelles ne suffisent pas à fournir une représentation fidèle de ces objets. En revanche, l'acquisition d'images spectrales couvrant plusieurs centimètres carrés permet de révéler les variations internes à l'échantillon, ce qui améliore son interprétation globale. Toutefois, ces images contiennent rapidement des milliers de spectres RBS, alors que l'interprétation manuelle d'un unique spectre RBS est déjà chronophage, traiter une image spectrale entière devient rapidement unimaginable pour un être humaine. De plus, l'automatisation du traitement par lots des spectres est insuffisante pour traiter des stratigraphies très différentes et nécessite encore un temps considérable. Dans ce contexte-là, il est essentiel de développer une méthode rapide, fiable et autonome, capable de réduire significativement le temps d'interprétation de ces spectres.

Cette étude vise à évaluer la faisabilité de construire des réseaux neuronaux artificiels capables de déterminer la stratigraphie d'objets complexes du patrimoine en se basant directement sur leurs spectres RBS. L'objectif est d'accélérer, automatiser et généraliser le traitement de ces données, rendant ainsi l'analyse de multitudes d'analyses ponctuelles et d'images spectrales rapide et fiable. La première étape de cette étude était de construire une large base de données de spectres RBS simulés, représentant des stratigraphies couramment rencontrées dans le domaine du patrimoine, notamment des feuilles d'or sur divers substrats. Cette base de données a ensuite servi à construire, entraîner et optimiser un réseau neuronal simple (Perceptron Multi-Couches). Pour un spectre expérimental donné en entrée, le réseau neuronal doit fournir en sortie une stratigraphie fiable. De multiples architectures et paramètres ont été testés afin d'entraîner et d'optimiser le réseau.

Ce poster présente la démarche mise en place afin de développer ce réseau neuronal capable d'interpréter des spectres RBS et les résultats obtenus.